# BUILT

## НЕИЗВЕСТНЫЕ ИСТОРИИ ИЗВЕСТНЫХ ЗДАНИЙ

Книга полна занимательных историй. Никогда инженеры не писали так вдохновляюще!
New York Times Book Review
BUILT
РОМА АГРАВАЛ

SHOUT
SHARE
IT

# Annotation

Как наша жизнь зависит от решений инженера? Почему рушатся одни мосты и веками стоят другие? Почему одни здания вызывают у нас дискомфорт, а другие, наоборот, – заставляют успокаиваться? Туго натянутые тросы над огромным мостом через реку, стальной скелет под стеклянной кожей высокой башни, трубопроводы и туннели, которые прячутся у нас под ногами, – все это и есть мир, который мы построили, и он многое говорит о человеческой изобретательности, о нашем взаимодействии друг с другом и с природой. Наша постоянно меняющаяся инженерная вселенная полна разных историй и тайн, и если вы захотите прислушаться и присмотреться, то вас ждет увлекательное приключение. Наверняка вы и не задумывались о том, что инженер может минимизировать трагедии в современном мире и спасти жизни людей? Быть может, вы не раз поднимали голову и, вглядываясь в силуэты зданий, пытались понять, как архитектура подстраивается под нашу жизнь? Станьте свидетелем исповеди инженера, бесконечно влюбленного в свою работу. Рома Агравал – инженер-строитель крупных международных проектов. Она оставила неизгладимый след в истории архитектуры, подарив миру множество произведений современного строительного искусства: от пешеходных мостов и скульптур до вокзалов и небоскребов, в число которых входит легендарный «Осколок».


- Рома Агравал
  - ○
  - ○
  - ○ Глава 1. Этаж
  - ○ Глава 2. Сила
  - ○ Глава 3. Огонь
  - ○ Глава 4. Глина
  - ○ Глава 5. Металл
  - ○ Глава 6. Камень
  - ○ Глава 7. Небо
  - ○ Глава 8. Земля
  - ○ Глава 9. Пустота
  - ○ Глава 10. Чистота
  - ○ Глава 11. Порядок
  - ○ Глава 12. Кумир
  - ○ Глава 13. Мост
  - ○ Глава 14. Мечта

- Благодарности
- Источники
- Источники изображений

# Рома Агравал
# Built: неизвестные истории известных зданий

© Roma The Engineer Ltd, 2018
© Попова А., перевод на русский язык, 2018
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2019

* * *

*Посвящается Маа и маленькому Сэмюелю*

# Глава 1. Этаж

В одной руке я сжимала плюшевого кота, боясь его потерять. А другой ухватилась за мамину юбку. Мне было страшно и волнительно оттого, что я попала в новый, странный и неизвестный мир, который вращался вокруг меня в постоянном движении, и я старалась удержать в руках хотя бы две знакомые вещи.

Сейчас, когда я думаю о Манхэттене, я всегда мысленно представляю ту первую поездку, когда я была еще совсем крошечной и очень впечатлительной: забавный запах выхлопных газов, крики уличных торговцев лимонадом, рой несущихся куда-то людей, которые врезались в меня безо всяких извинений. Незабываемые переживания для ребенка, который жил вдали от крупных городов. Вместо неба я увидела башни из стекла и стали, которые закрывали солнце. Что это за чудовища? Как мне на них забраться? Как они выглядят сверху? Я вертела головой то вправо, то влево, а мама тащила меня по оживленным улицам. Я ковыляла за ней, задрав голову наверх и не в силах оторвать взгляд от этих гигантских столбов, задевающих облака.

Дома я пыталась построить то же самое из кубиков с помощью миниатюрных игрушечных подъемных кранов. В школе я рисовала высокие прямоугольники на больших листах бумаги и раскрашивала броскими яркими цветами. Нью-Йорк прочно вошел в мир моего воображения, а в жизни я снова и снова возвращалась в этот город и любовалась новыми башнями, которые появлялись на вечно меняющемся горизонте города.

Когда мой отец работал инженером-электриком, мы несколько лет жили в Америке. Но мы жили не в одном из парящих небоскребов, которые так поражали меня, когда я бывала на Манхэттене, а в скрипучем деревянном доме на холмах за городом. Когда мне было шесть лет, отец бросил заниматься инженерным делом и стал заниматься семейным бизнесом в Мумбаи, и мы переехали в семиэтажную бетонную башню с видом на Аравийское море. Когда мои куклы Барби наконец приехали в целости и сохранности в наш новый дом, совершив длинное путешествие через океан в контейнерах, я позаботилась о том, чтобы им было уютно. Папа помог мне собрать игрушечные краны и постелил большую белую простыню, чтобы детальки не потерялись. С громким жужжанием я отправляла на место длинные пластиковые трубки и сложенные куски картона, и так я построила дом своим куклам. Вероятно, это был мой первый шаг к карьере инженера-строителя.

У меня был американский акцент, и я была – а вы это скоро поймете, если еще не поняли, – немножко ботаником, так что поначалу в новой школе мне было сложно. В школе меня дразнили «грамотейкой». Но со временем я нашла друзей и учителей, которые меня понимали. Я носила большие очки в золотой оправе и с удовольствием читала учебники по физике, математике и географии. Еще мне нравилось рисование, а вот химия, история и языки давались плохо. Мама в университете изучала математику и естественные науки, а работала программистом, и она поощряла мой растущий интерес к наукам, давала мне дополнительные задачи и книги для чтения. За школьные годы я больше всего полюбила эти предметы и решила стать космонавтом или архитектором, когда вырасту.

Тогда я даже не знала о профессии инженера-строителя и подумать не могла, что однажды буду участвовать в проектировании великолепного небоскреба под названием «Осколок».

Я обожала учиться, и родители решили, что мне стоит поучиться в другой стране, потому что это прекрасная возможность расширить свои горизонты. Так что в пятнадцать лет я уехала в Лондон, где в старших классах изучала математику, физику и проектирование. Очередная новая школа в новой стране, только на этот раз я быстро нашла единомышленников – девчонок, которые так же, как и я, увлекались законом Фарадея, а в свободное время проводили эксперименты в лаборатории. Блестящие учителя открыли мне путь к изучению физики в университете, и я переехала в Оксфорд.

В школе я физику еще понимала. В университете уже нет – по крайней мере, поначалу. Свет – это одновременно и волна, и частицы? Пространство и время можно исказить? Путешествия во времени математически возможны?! Я сильно увлеклась, но разобраться во всем этом было довольно трудно. Я всегда немного отставала от своих однокашников. Для меня было настоящей наградой, когда я наконец понимала ту или иную тему. Я совмещала походы в библиотеку с уроками бальных и латинских танцев и параллельно училась стирать, готовить (вероятно, с небольшим успехом, как вы потом увидите) и всячески заботиться о себе. Мне нравилось изучать физику; детские мечты о том, чтобы полететь в космос или стать архитектором, превратились в далекие воспоминания. В то же время я слабо представляла, чем хочу заниматься в жизни.

Как-то летом я работала на факультете физики в Оксфордском университете и проектировала планы систем безопасности в разных зданиях. Мою задачу едва ли можно

назвать революционной, зато люди, с которыми я работала, работали как раз над такими проектами. Это были инженеры, и их работа заключалась в проектировании оборудования, на котором физики смогут найти частицы, которые определяют устройство нашего мира. Вы легко можете себе представить, что я замучила их бесконечными вопросами и то и дело поражалась масштабам их работы. Один из них проектировал металлический держатель для стеклянной линзы – можно подумать, что это просто, если не учитывать, что весь аппарат нужно будет охлаждать до -70˚С. При замерзании металл сжимается гораздо сильнее, чем стекло, и если тщательно не продумать этот держатель, то охлажденный металл разобьет линзу. Это всего лишь маленькая деталь в огромном лабиринте различных устройств, но это сложная и творческая задача. В свободное время я часами раздумывала над тем, как бы я решила эту задачу.

Внезапно меня осенило: я хочу решать сложные практические задачи с помощью физики и математики, чтобы каким-то образом изменить мир. И именно в этот момент из детских воспоминаний возродилась моя любовь к небоскребам. Я буду инженером-строителем и проектировщиком зданий. Чтобы переквалифицироваться из физика в инженеры, я год училась в Имперском колледже Лондона, окончила его, получила работу и стала инженером.

Как инженер-строитель, я отвечаю за то, чтобы здания, которые я проектирую, стояли. За последние десять лет я участвовала в проектировании удивительно разнообразных конструкций. Я стала частью команды, которая построила «Осколок» – самую высокую башню в Западной Европе, – и шесть лет производила вычисления для проектирования ее шпиля и фундамента; я работала над необычным пешеходным мостом в Ньюкасле и круглыми сводами купола вокзала «Кристал Пэлас» в Лондоне. Я спроектировала сотни новых квартир, вернула былую славу георгианскому коттеджу и позаботилась о том, чтобы скульптура художника стояла как следует. Моя работа представляет собой создание различных сооружений на основе принципов математики и физики (что само по себе невероятно весело), но в ней гораздо больше интересного. Во-первых, современный инженерный проект – это огромная командная работа. В прошлом инженеры, вроде Витрувия (который написал первый трактат по архитектуре) или Брунеллески (который построил невероятный купол Флорентийского собора), были известны как мастера-строители. Они разбирались во всех дисциплинах, связанных со строительством. В настоящее время здания более сложные с технической точки зрения, и один

человек попросту не может разбираться в каждом аспекте строительства. У каждого из нас есть своя узкая специализация, и главная задача в том, чтобы увлечь всех в замысловатый и тихий неистовый танец, в котором мы соберем вместе материалы, физическую силу и математические вычисления. Вместе с архитекторами и другими инженерами мы обсуждаем вопросы проектирования. Наши чертежи помогают строителям, а геодезисты рассчитывают расходы и занимаются логистикой. Рабочие на стройке получают материалы и воплощают в них наше видение. Порой трудно себе представить, что все эти хаотические действия приводят к созданию твердой структуры, которая простоит многие десятилетия или даже столетия.

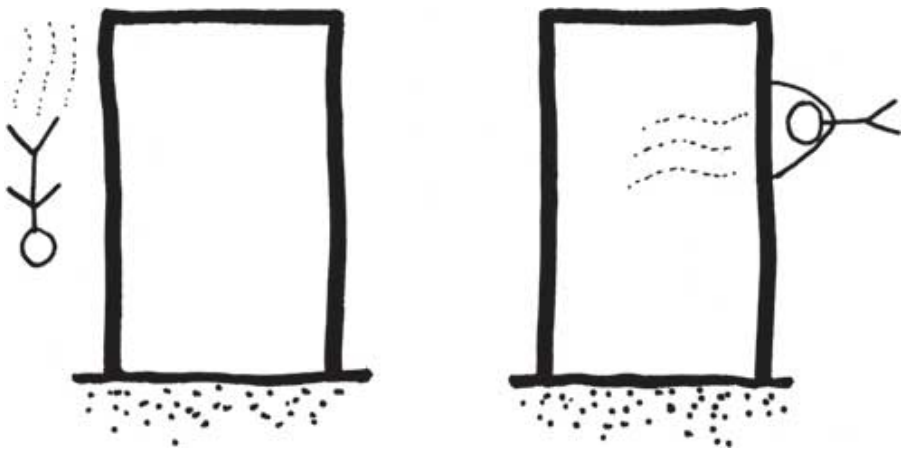
Для меня каждое новое здание становится чем-то очень личным, когда я наблюдаю, как оно растет и обретает свой неповторимый характер. Сначала мы обсуждаем несколько набросков, потом я постепенно понимаю, на чем конструкция будет держаться, как сделать ее высокой и дать возможность меняться согласно требованиям времени. Чем больше времени я занимаюсь проектом, тем больше я его уважаю и даже люблю. Когда здание готово, я иду встретиться с ним лично и обхожу вокруг. Даже потом, как мне кажется, между нами сохраняется некоторая связь, и я наблюдаю издалека, как другие люди встают на мое место и развивают свои отношения с моим созданием, селятся в нем или работают, и как оно защищает их от внешнего мира.

Конечно, мои чувства к сооружениям, над которыми я работала, носят особенно личный характер, но, на самом деле, мы все тесно связаны с работами инженеров, которые нас окружают, – улицами, по которым ходим, туннелями, по которым проносимся в метро, мостами, которые переходим. Они делают нашу жизнь проще, а мы заботимся о них. В свою очередь, они становятся безмолвной, но важной частью нашей жизни. Мы чувствуем себя энергичными профессионалами, когда заходим в стеклянный небоскреб с аккуратными рядами офисных столов. Скорость, с которой мы перемещаемся, подчеркивают стальные кольца, мимо которых пролетает поезд в метро. Неровные кирпичные стены и мощенные камнем тротуары напоминают нам о прошлом, о нашей истории. Сооружения придают нашей жизни форму и поддерживают ее, формируя пейзаж нашего бытия. Мы часто их не замечаем или не знаем об этом, но у каждого сооружения своя история. Туго натянутые тросы над огромным мостом через реку, стальной скелет под стеклянной кожей высокой башни, трубопроводы и туннели, которые прячутся у нас под ногами, – все это и есть мир, который мы построили, и он

многое говорит о человеческой изобретательности, о нашем взаимодействии друг с другом и с природой. Наша постоянно меняющаяся инженерная вселенная полна разных историй и тайн, и если вы захотите прислушаться и присмотреться, то вас ждет увлекательное приключение.

Надеюсь, что в этой книге вы вместе со мной окунетесь в эти истории и тайны: вы по-новому взглянете на сотни привычных сооружений, которые вас окружают и которые вы видите то сверху, то снизу, то изнутри; что вы в своем собственном доме, своем городе или деревне и на окраинах увидите чудо; что вы станете смотреть на мир совершенно другими глазами – глазами инженера.

# Глава 2. Сила



Очень необычное ощущение – дотронуться до сооружения, которое ты спроектировал. Моим первым проектом после университета стал пешеходный мост Нортумбрийского университета в Ньюкасле в Англии. Два года я работала с планами архитекторов и помогала воплотить их видение в жизнь, исписала сотни страниц вычислениями и создавала бесчисленные компьютерные модели. В конце концов его построили. Когда уехали подъемные краны и экскаваторы, мне наконец удалось постоять на стальной конструкции, в создании которой я участвовала.

Пешеходный мост Нортумбрийского университета построили в 2007 году, и он соединяет две основные части территории университета в Ньюкасле-апон-Тайнев Англии

Я немного постояла на твердой земле перед мостом, прежде чем ступить на него. Я помню этот момент: я была взволнована и в то же время не верила своим глазам – меня поражало, что я принимала участие в возведении этого прекрасного моста, по которому каждый день будут ходить сотни людей. Я посмотрела наверх – на его высокую мачту и расходящиеся от нее тросы, которые надежно держат тонкое полотно над шоссе, – он легко выдерживает свой собственный вес и мой. Парапеты, предусмотрительно расположенные под таким углом, чтобы на них было трудно залезть, отражали холодный солнечный свет. Подо мной проносились машины и грузовики, не обращая внимания на юного инженера, которая гордо стоит на «своем» мосту и изумляется своему первому осязаемому вкладу в этот мир.

Конечно же, он очень прочный. В конце концов, все числа и модели, которые я тщательно проработала, чтобы вычислить, какие силы будут действовать на мой мост, проверили и перепроверили. Потому что инженеры не могут позволить себе допускать ошибки. Я понимаю, что каждый день тысячи людей будут пользоваться сооружениями, которые я проектирую: они будут по ним переходить, работать в них или жить и совершенно не будут волноваться о том, что мои творения могут их подвести.

Мы вкладываем в инженерное дело свою веру и усилия ног своих (часто в буквальном смысле), и инженер отвечает за то, чтобы сооружения были прочными и надежными. При всем этом, история показывает, что что-то может пойти не так. Днем 29 августа 1907 года жители города Квебека решили, что началось землетрясение. На самом деле в 15 километрах от города происходило нечто еще более немыслимое. На берегах реки Святого Лаврентия воздух разрывали звуки рвущегося металла.

Стою на пешеходном мосту Нортумбрийского университета – моем первом инженерном проекте

Заклепки, которые скрепляли конструкцию моста, отрывались и свистели над головами напуганных рабочих.

Стальные балки сложились как бумага, и сам мост – вместе с рабочими, которые находились на нем, – погрузился под воду. Это одно из самых эпичных крушений моста за всю историю строительства и жестокий пример того, как неумелое руководство и просчеты могут обернуться катастрофой.

Мосты расширяют города, соединяют людей и способствуют развитию торговли и коммуникаций. Идея о строительстве моста через реку Святого Лаврентия обсуждалась в парламенте с 1850-х гг. С технической точки зрения это было настоящее испытание: в самом узком месте ширина реки составляет три километра, вода в ней глубокая, а течение быстрое. Зимой вода замерзала, и в канале образовывались нагромождения льда высотой до 15 метров. Тем не менее для реализации этого проекта учредили компанию «Квебек-Бридж» и в 1900 году начали работу над фундаментом.

Эдвард Хоар, главный инженер компании, до этого никогда не занимался строительством мостов длиннее 90 м (даже в оригинальных планах проекта называлась «свободная расчетная длина» – то есть длина участка без каких-либо опор – чуть более 480 м). Таким образом было принято судьбоносное решение заручиться поддержкой Теодора Купера в качестве консультанта. Купер был широко известен как один из лучших специалистов по строительству мостов и написал блестящий доклад об использовании стали в сооружении железнодорожных мостов. Теоретически он был похож на идеального кандидата. Но с самого начала что-то пошло не так. Купер жил далеко, в Нью-Йорке, и из-за проблем со здоровьем редко посещал строительную площадку. Тем не менее он настоял на том, чтобы лично отвечать за контроль над производством стали и строительством. Он отказался предоставить свой проект на проверку кому-либо еще и полагался лишь на своего относительно неопытного инспектора Нормана Маклюра, который сообщал ему, как идут дела на площадке. Возведение стальной конструкции началось в 1905 году, и в последующие два года Маклюр все больше волновался о том, как идет процесс строительства. Начнем с того, что стальные детали, которые доставили с завода, оказались тяжелее, чем ожидалось. Некоторые из них даже оказались согнутыми, а не прямыми, потому что не выдерживали собственного веса. Еще более тревожит тот факт, что многие детали, которые установили рабочие, деформировались еще до окончания строительства, а это означало, что они недостаточно прочные и не выдерживают нагрузки, для которой предназначены.

Деформация произошла в результате решения Купера

изменить конструкцию моста относительно первоначального плана и удлинить центральный пролет (часть моста в середине, под которой нет опор) почти до 549 м. Вероятно, разум Купера затуманили амбиции: принимая такое решение, он, очевидно, надеялся, что станет инженером, построившим первый в мире мост с таким длинным пролетом, и заберет это звание у проектировщиков Форт-Бриджа в Шотландии. Чем длиннее пролет, тем больше материала на него нужно и тем тяжелее конструкция. Новый проект Купера весил примерно на 18 % больше изначального, и, не уделив достаточно внимания вычислениям, он решил, что конструкция по-прежнему прочная и выдержит дополнительный вес. Маклюр был с ним не согласен, и они спорили об этом в переписке. Но так ничего и не решили.

Наконец Маклюр так забеспокоился, что распорядился приостановить строительство и отправился на поезде в Нью-Йорк, чтобы выяснить вопрос с Купером. В его отсутствие инженер на строительной площадке отменил его распоряжение и продолжил строительство, которое в результате закончилось трагедией. Всего за пятнадцать секунд вся южная часть моста – 19 тысяч тонн стали – рухнула в реку и погребла под водой 75 из 86 рабочих.

Сцена разрушения после трагедии 1907 года при строительстве Квебек-Бриджа через реку Святого Лаврентия в Квебеке в Канаде

К крушению моста привело много проблем и ошибок. В частности, катастрофа показала, как опасно наделять огромной властью одного инженера, за которым никто не присматривает.

Организации профессиональных инженеров в Канаде и других странах мира стали решать эту проблему и стараться предотвратить ошибки, совершенные при строительстве Квебек-Бриджа. В конечном же счете большая часть ответственности лежит на Теодоре Купере, который неправильно рассчитал вес моста. Ведь план строительства не учитывал того, что конструкция не выдержит собственного веса.

Разрушение Квебек-Бриджа показывает, к каким катастрофическим последствиям может привести неквалифицированная инженерная работа. Немалая часть работы инженера заключается в том, чтобы выяснить, как конструкции будут выдерживать множество сил, приложенных к ним, которые их толкают, тянут, трясут, скручивают, гнут, продавливают, разъединяют и разрывают на части. Однако гравитация – самый важный из всех этих факторов. Это вездесущая сила, благодаря которой существует солнечная система, и все, что находится на нашей планете, стремится к ее ядру. Таким образом, к каждому объекту приложена сила, которую мы называем весом. Эта сила *проходит* через объект. Подумайте о весе разных частей тела. Вес кисти руки воздействует на предплечье, оно, в свою очередь, на плечо, а вес плеча ложится на позвоночник. Сила стремится вниз по позвоночнику к бедрам, а потом, пройдя тазовую кость, разделяется надвое, проходит через каждую ногу и устремляется в землю. Примерно то же можно наблюдать, если построить башню из соломинок и полить ее сверху водой: вода побежит вниз всеми путями, какие найдет, и будет разделяться там, где возможно.

Когда инженер проектирует конструкцию, ему необходимо понимать, куда приложена сила и какая, и убедиться, что конструкция, через которую эта сила проходит, выдержит нагрузку.

Существуют два основных вида силы, которые гравитация (а также другие явления вроде ветра и землетрясений) создает в конструкциях: *сжатие* и *растяжение*. Если сложить лист плотной бумаги в цилиндр, поставить вертикально на стол, а сверху положить книгу, то книга будет давить на цилиндр. *Сила*, с которой книга давит на цилиндр (равная массе книги, умноженной на гравитационную постоянную g), проходит через цилиндр и давит на стол (подобно тому, как вес тела проходит через ногу). Таким образом, цилиндр (как и нога) подвергается *сжатию*.

И наоборот, если взять веревку, привязать к одному концу книгу, а другой подвесить, то подвешенная книга (на которую по-прежнему воздействует сила гравитации) будет растягивать

веревку. Сила, воздействующая на книгу, проходит через веревку, на которую воздействует сила *растяжения*. Такое же воздействие кисть руки оказывает на предплечье.

Опора книги с помощью сжатия (слева) и растяжения (справа)

В первом примере книга не падает на стол, потому что бумажный цилиндр достаточно прочный, чтобы противостоять приложенному к нему *сжатию*. Во втором примере книга не падает потому, что веревка достаточно прочная, чтобы противостоять приложенной к ней силе *растяжения*.

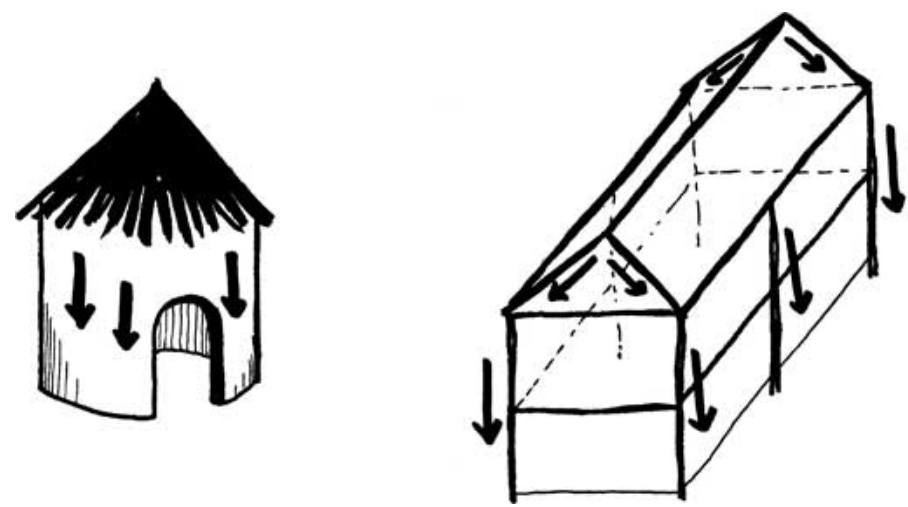
Чтобы конструкция сломалась, можно взять более тяжелую книгу. Сила, с которой эта книга будет воздействовать на опору, будет больше, потому что увеличилась масса книги. Цилиндр не выдержит такой вес, сломается, и книга упадет на стол. Аналогично, если более тяжелую книгу подвесить на веревке, то растяжение веревки окажется слишком большим. Веревка порвется, и книга упадет.

Силы, воздействующие на мост, происходят из его собственного веса, а также веса людей и транспортных средств, которые по нему передвигаются. Когда я работала над строительством пешеходного моста Нортумбрийского университета, то делала вычисления, чтобы понять, какие силы воздействуют на конструкцию. В результате я точно знала, какова сила сжатия и растяжения, приложенная к каждой детали. Я использовала компьютерную модель для проверки каждой секции моста, а потом рассчитывала, какой величины должны быть стальные детали, чтобы они не согнулись, не сломались и не продавились.

Вид силы и угол ее приложения зависят от того, как собрана конструкция. Собрать ее можно двумя основными способами. Первый известен как *система опор*, а второй как *рамная конструкция*.

Глиняные дома наших древних предков, толстые стены которых они возводили из глины, располагая их в форме круга или квадрата, сооружались по первому принципу. Стены таких

одноэтажных жилищ были прочными и выполняли несущую функцию: вес конструкции спокойно выдерживал сжатие, воздействующее на стены. Этот принцип похож на книгу на бумажном цилиндре, на стенки которого воздействует одинаковая сила сжатия. Если к хижине пристраивали дополнительные этажи, то в какой-то момент сила сжатия начинала разрушать глиняные стены, несущие нагрузку, и они осыпались, точно так же как под весом более тяжелой книги складывается бумажная трубка. Когда у наших предков в распоряжении была древесина, они строили каркасные дома: связывали вместе бревна, и получался каркас, или скелет, дома, в котором силы распределяются между собой. Чтобы надежно укрыться внутри, между бревнами натягивали шкуры животных или плели стены из соломы. Если у глиняных домиков были прочные несущие стены, защищавшие жителей, то у деревянных домов появляются две четкие структуры: бревна, между которыми распределяются силы, и своеобразные «перегородки» или шкуры животных, которые нагрузки не несут. Способ распределения сил является фундаментальным различием между несущими и каркасными конструкциями.



Два типа постройки дома: с несущими стенами (слева) и с каркасом (справа)

Со временем материалы, которые люди использовали при постройке несущих стен и каркасов, становились все более сложными. Несущие стены стали сооружать из кирпича и камня, что сделало их гораздо прочнее глиняных. В начале XIX века, после Промышленной революции, железо и сталь стали изготавливать в промышленных масштабах, и эти материалы

начали использовать не только в вооружении и судостроении, но и в гражданском строительстве. Был вновь открыт бетон (известно, что его производили древние римляне, но с падением империи рецепт был утерян). Эти эволюционные шаги навсегда изменили облик наших домов. Так как сталь и бетон гораздо прочнее древесины и подходят для сооружения больших каркасов, мы смогли строить башни гораздо выше, а мосты гораздо длиннее. Сегодня крупнейшие и самые сложные конструкции – например, изящный стальной арочный мост Харбор-Бридж в Сиднее, треугольная геометрическая Херст-Тауэр в Манхэттене, легендарный национальный стадион «Птичье гнездо» в Пекине, построенный к Олимпиаде 2008 года, – имеют каркасную конструкцию.

Когда я начинаю проектировать новое сооружение, то изучаю детальные эскизы архитекторов, в которых передано их видение того, как должна выглядеть готовая конструкция. Затем инженеры разрабатывают нечто вроде рентгеновского изображения, на котором можно рассмотреть, какой каркас должен находиться внутри этой конструкции, чтобы противостоять гравитации и другим приложенным к ней силам. Я представляю, где должен проходить скелет здания и где нужно соединить все его косточки, а также рассчитываю, насколько большими они должны быть, чтобы скелет был прочным. Черным маркером поверх эскизов архитекторов я подрисовываю кости к плоти. Толстые черные линии придают цветным рисункам ощущение прочности. Нам с архитекторами неизбежно приходится многое обсуждать, и иногда достаточно оживленно, – ведь в поисках решения нужно идти на компромиссы. Часто в том месте, где они представляли свободное пространство, мне нужно поставить колонну; бывает и так, что в каких-то местах лишняя опора не нужна, и тогда я даю им больше простора. Нам необходимо понимать видение друг друга, особенно когда возникают технические проблемы: нужно приходить к балансу между визуальной красотой и технической целостностью. В конце концов у нас получается проект, в котором эстетическая составляющая и физическая структура находятся (почти) в идеальной гармонии.

Каркасы наших конструкций представляют собой паутину из колонн, балок и распорок. Колонны – это вертикальные части каркаса; балки – горизонтальные; а распорки – детали, расположенные под другими углами. Например, если посмотреть на фотографию моста Харбор-Бридж, то станет видно, что его конструкция состоит из стальных деталей, расположенных под различными углами, то есть из огромного количества колонн, балок и распорок. Понимая, как колонны и балки

взаимодействуют между собой и поддерживают друг друга, какие силы на них действуют и, что важнее всего, от чего они могут сломаться, – мы проектируем конструкции так, чтобы они не развалились.

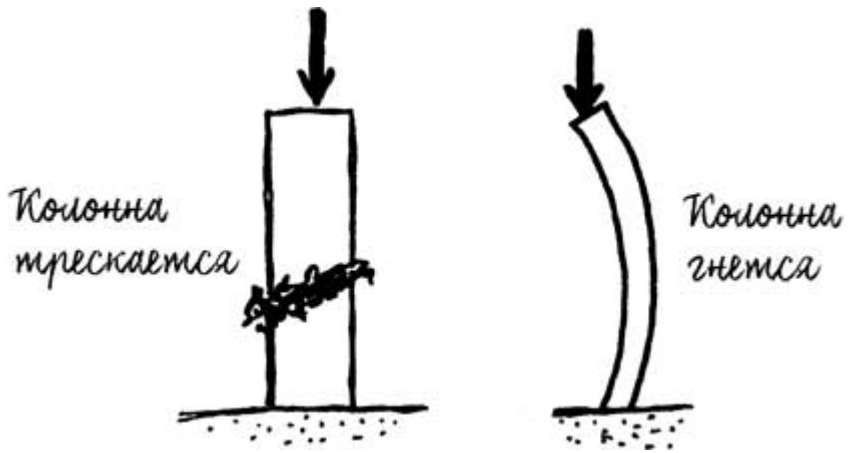
Мост Харбор-Бридж в Сиднее. Построен в 1930 году для железнодорожного, автомобильного и пешеходного сообщения между Северным берегом и центральным деловым районом Сиднея, Австралия

Колонны тысячелетиями противостояли силе гравитации, а греки и римляне превратили их в форму искусства. Красота и величие афинского Парфенона создается в основном благодаря внешнему ряду дорических мраморных колонн. Над руинами Римского форума возвышаются монументальные колонны, которые поддерживают хрупкие обломки храмов или просто печально устремляются в небо. Конечно, колонны выполняли важнейшую практическую функцию – поддерживали структуры, – но это не мешало инженерам античности украшать их резьбой, навеянной самой природой и мифологией. Коринфскую колонну, вершину которой украшает орнамент из причудливо закрученных листьев, изобрел, как считается, греческий скульптор Каллимах, когда обратил внимание на растение акант, которое проросло сквозь корзину, оставленную на могиле коринфской девушки, и обвилось вокруг нее.

На форуме десятки примеров колонн коринфского ордера, которые веками оставались классическим образцом гражданской

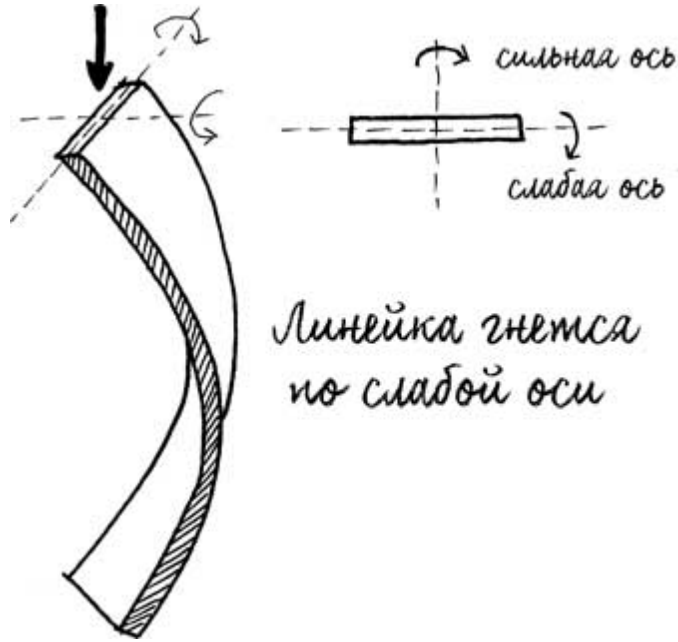
архитектуры и даже украшают, например, фасад здания Верховного суда Соединенных Штатов, а их более скромные версии – вход в викторианский многоквартирный дом, где я живу.

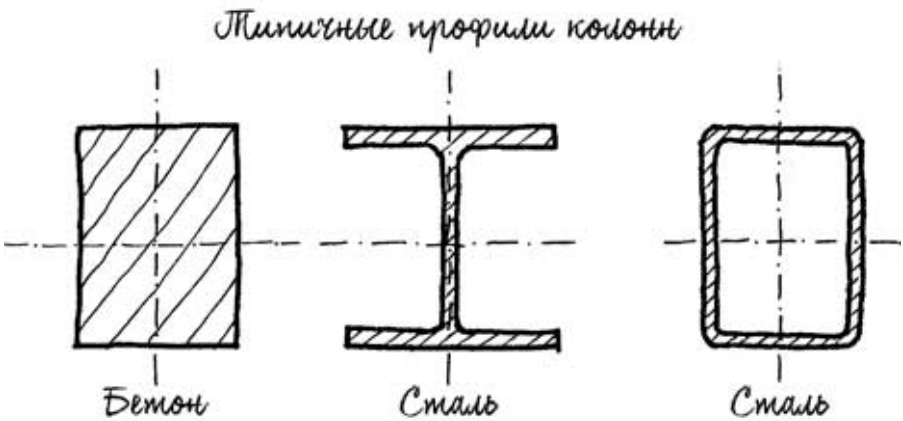
Колонны, как правило, противодействуют силе сжатия. Один из вариантов, как они могут пострадать, – это когда на них воздействует такая большая сила, что материал колонн не выдерживает и просто ломается или дает трещины. Как раз это и случается с бумажной трубкой, если на нее положить слишком тяжелую книгу. Возьмите пластиковую линейку, поставьте вертикально на стол и надавите ладонью сверху: вы увидите, как она начинает сгибаться. Чем сильнее давишь, тем больше сгибается линейка – и в какой-то момент она просто треснет пополам.




Колонна может разрушиться двумя способами: треснуть (слева) и согнуться (справа)

При проектировании колонн необходимо соблюдать хрупкий баланс. Хочется, чтобы она была тонкой и не занимала слишком много места, но если она окажется слишком тонкой, то не выдержит нагрузки. В то же время хочется использовать материал, достаточно прочный для того, чтобы она не сломалась. Колонны, которые использовались в античных сооружениях, обычно были толстыми и массивными и в основном изготавливались из камня, так что они вряд ли сгибались. В отличие от них, современные стальные колонны гораздо тоньше, из-за чего они легче сгибаются.



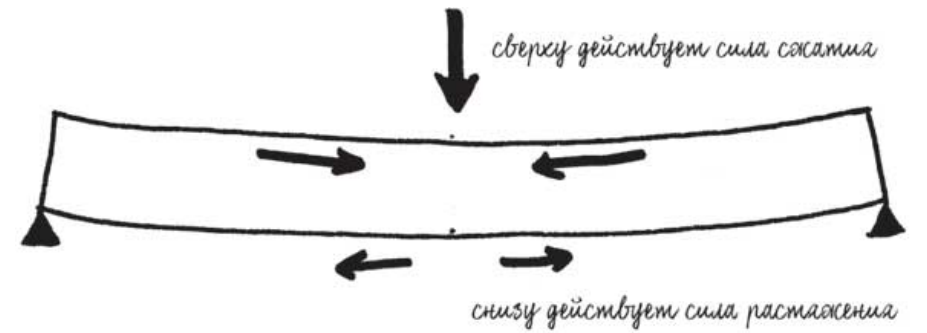

Сгибание линейки показывает, как тонкая опора сгибается вдоль слабой оси Y (вверху), в то время как бетонные и стальные колонны изготавливают так, чтобы они противостояли давлению по обеим осям X и Y (внизу)

Линейка широкая в одном направлении и узкая в другом, и, как вы убедились, когда надавили на нее перпендикулярно, она согнулась по более слабой оси. Чтобы такого не произошло, современные стальные колонны обычно имеют форму буквы «H» на торце, так что по обеим осям они достаточно прочные и могут выдерживать гораздо большую нагрузку.

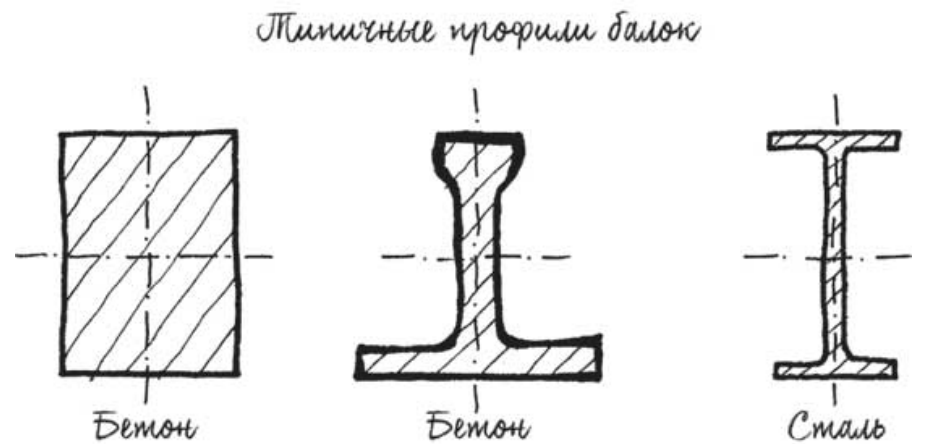
Балки работают по-другому. Они образуют каркас полов.

Когда мы стоим на балке, она незаметно прогибается и

распределяет наш вес на колонны, которые ее поддерживают. Колонны, в свою очередь, сжимаются и передают наш вес земле. Если встать в середину балки, то на каждый ее конец придется по половине нашего веса. А колонны передадут эту нагрузку вниз. Мы не хотим, чтобы балки слишком сильно сгибались, когда мы на них встаем, отчасти потому, что чувствуем себя некомфортно, если пол под ногами движется, но еще и потому, что тогда они могут сломаться. Балки должны быть надлежащей жесткости, а для их усиления мы используем глубину, геометрию или особые материалы.




Балка сгибается под любым весом, при этом сверху на нее действует сила сжатия, а снизу – сила растяжения




Чтобы балки не гнулись, их делают особой формы

Когда балка сгибается под нагрузкой, вес проходит через нее неравномерно. Верхняя часть балки сжимается, а нижняя растягивается, то есть сверху на нее воздействует сила сжатия, а снизу – сила растяжения. Попробуйте согнуть руками морковку: если попытаться согнуть ее буквой «U», то она рано или поздно сломается снизу. Это происходит в тот момент, когда материал,

из которого сделана морковка, не выдерживает силы растяжения, действующей на вершину дуги. Если повторить тот же эксперимент с морковками разных диаметров, станет очевидно, что более тонкие легче сгибаются. Чтобы согнуть более толстую морковку до той же дуги, нужно приложить гораздо больше сил. Таким же образом, чем больше поперечное сечение у балки, тем она прочнее и тем меньше она сгибается под нагрузкой.

Умная геометрия служит еще одним способом сделать балку прочнее. Самая большая сила сжатия действует на балку сверху, а самая большая сила растяжения – снизу. Поэтому чем больше материала сверху и снизу балки, тем она прочнее. Объединяя эти два принципа – толщину и геометрию, – мы получаем наилучшую форму балки: букву «I» (в срезе она похожа на эту букву), потому что в ней больше всего материала как раз сверху и снизу, где действуют самые большие силы. Большинство стальных балок как раз такой формы. (Они немного отличаются от колонн в форме буквы «H», потому что имеют большую толщину, нежели ширину, а колонны в форме буквы «H» в разрезе ближе к квадрату.) Бетонные балки тоже можно сделать такой формы, но гораздо легче заливать бетон в обычную прямоугольную форму, так что из соображений экономии и практичности большинство бетонных балок в срезе имеют форму простого прямоугольника.

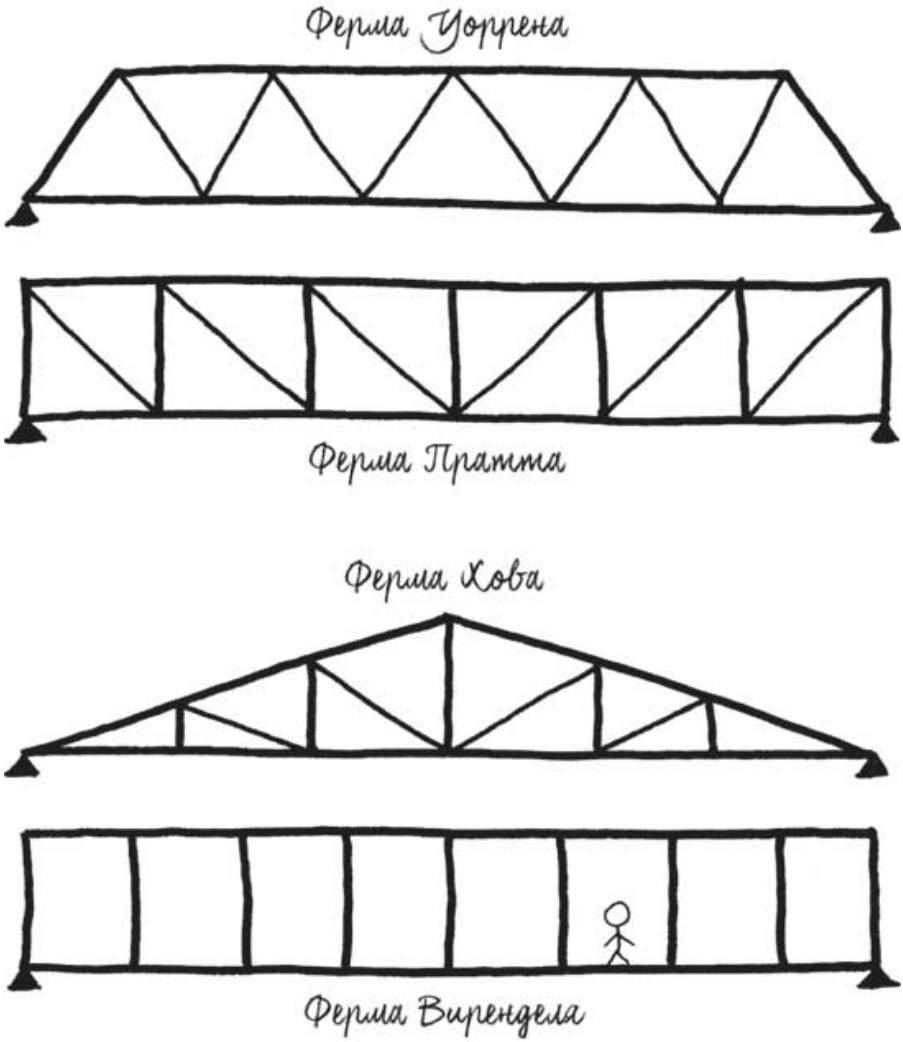
Большие мосты вроде Квебекского моста слишком длинные для «обычных» балок в форме буквы «I». Чтобы покрыть такое расстояние, их пришлось бы сделать такими вытянутыми и тяжелыми, что их попросту нельзя было бы поднять на нужное место. Вместо этого мы используем другой тип структуры, который основан на устойчивости треугольника, – *ферму*.

Возьмите четыре палочки и свяжите их концы так, чтобы получился квадрат. Потом надавите на его сторону: квадрат превратится в ромб и сломается. Треугольники, в отличие от квадратов, не деформируются и не ломаются от подобной нагрузки. Ферма – это конструкция из балок, колонн и распорок, образующих между собой треугольники, в которой силы хитро распределяются между всеми частями конструкции. Для создания фермы нужны более мелкие и легкие детали, между которыми образуется пустое пространство, так что для такой конструкции нужно гораздо меньше материала, чем для аналогичной конструкции из горизонтальных балок в виде буквы «I» на опорах.

Квадрат по своей природе гораздо менее прочный, чем треугольник

Фермы легче строить, потому что небольшие стальные детали легче транспортировать на стройку и соединять между собой. В конструкции большинства крупных мостов используются фермы. Взгляните на мост Золотые Ворота: по всей длине моста на уровне автомобильной дороги можно увидеть узор из металлических треугольников. Они напоминают чередующиеся буквы «N» и «И» – а все вместе составляют тщательно спроектированные треугольники фермы.

Благодаря гравитации на все объекты, находящиеся на поверхности земли, действует предсказуемая сила растяжения. Инженер понимает ее природу и может спроектировать колонны, балки и фермы так, чтобы ей противостоять. Но есть и другие, не менее разрушительные, силы, которые не так просто свести к уравнению. Одной из них является ветер. Ветер случаен, изменчив, непредсказуем и на протяжении веков бросает вызов инженерам разных эпох, по-прежнему ставя им задачи, которые необходимо решать, если они хотят, чтобы их конструкции не развалились.




Большинство ферм состоят из небольших треугольников, но иногда в них есть и квадраты

Когда я была в Афинах, самым впечатляющим памятником для меня стала огромная белая мраморная восьмиугольная башня на Римской агоре к северу от Акрополя. Ее построил Андроник Киррский, македонский астроном, около 50 года до н. э. Башня ветров, или часы Андроника Киррского, служила часами с восемью солнечными циферблатами, водяными часами и флюгером. Прогуливаясь вокруг башни, я увидела, что на каждой из ее восьми граней наверху расположен рельеф, изображающий одного из восьми богов ветра, – крылатые фигуры, устремленные вперед с благосклонным либо суровым выражением лица, а иногда с амфорой или гирляндой цветов в руках. Первоначально

на верхушке башни располагалась бронзовая статуя Тритона и выполняла функцию флюгера, указывая в сторону того бога, чей ветер дул в данный момент.

Эта башня – дань уважения римлян богам ветров, а также свидетельство их потенциально разрушительной силы. Римский мастер-строитель Марк Витрувий Поллион (р. в 80 г. до н. э.), которого иногда называют «первым архитектором», подробно рассказывает о важности учета ветра в строительстве в труде под названием *«Об архитектуре»* – фундаментальном десятитомном трактате о проектировании сооружений. В книге первой он называет четыре основных направления: *Солануc* (восток), *Аустер* (юг), *Фавоний* (запад), *Септентрио* (север) – и других четырех, расположенных между четырьмя основными ветрами.

Меня изумляет то, насколько глубоко римские инженеры понимали, как ветер по-разному воздействует на строения с разных направлений. Несмотря на то что тот способ, которым современные инженеры рассчитывают эти силы, гораздо сложнее, основы нашей работы высечены в скульптурах той восьмиугольной башни еще 2000 лет назад.

Ветер воздействует на строения по всей планете. Когда я работаю над конструкцией ниже 100 метров, я, как правило, пользуюсь картой ветров. В целом это погодная карта, на которой указана основная скорость ветра по всем направлениям в том или ином месте и которая формировалась за десятилетия измерений. Я беру основную скорость ветра и учитываю ее в ряду других измерений, которые показывают, например, как далеко это место расположено от моря, на какой высоте находится, а также рельеф окружающей местности (сколько вокруг холмов и других строений). Формулы объединяют все эти факторы, и я узнаю, по каким из 12 направлений (каждые 30 градусов окружности) и с какой силой ветер будет воздействовать на конструкцию – а это почти то же, что и восемь направлений, названных Витрувием и запечатленных в рельефах Башни ветров.

Но когда я проектирую более высокое здание, такое как небоскреб, – числовые значения силы ветра уже не действуют. Ветер не линеен: он не изменяется предсказуемым способом по мере набора высоты. Если попытаться экстраполировать имеющиеся данные для 100-метровых башен или использовать математические хитрости, чтобы подогнать цифры под башни высотой 300 метров, результаты будут нереалистичными. Вместо этого строение нужно испытать в аэродинамической трубе.

Часы Андроника Киррского (Башня ветров), построенные во II–I вв. до н. э. в Афинах, Греция

Когда я работала над проектом 40-этажной башни рядом с каналом Риджентс в Лондоне, я посетила один из таких объектов. Миниатюрный мир в аэродинамической трубе уже сам по себе

настоящее чудо. В Милтон-Кинсе моделисты создали уменьшенную копию моего здания в масштабе 1 к 200. Кроме того, они создали уменьшенные копии всех остальных строений в этой местности, и весь макет расположился на поворотной платформе. Здания, окружающие мой проект, были очень важны для получения достоверных данных. Если бы моя башня располагалась посередине поля, то ветер воздействовал бы на нее напрямую и не встречал на пути никаких препятствий. Но в центре мегаполиса плотная застройка различными зданиями влияет на направление ветра и турбулентность, так что силы воздействуют на башню совершенно по-другому.

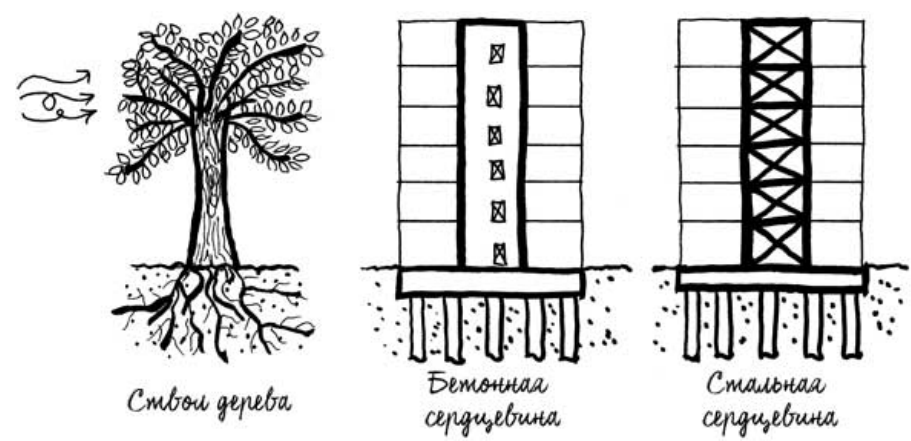
Я стояла за макетом своего здания и смотрела в «туннель» – длинную квадратную трубу с гладкими стенками – на огромный вентилятор по ту сторону. Вентилятор установили на ту скорость, с какой будет дуть ветер на здание в определенном направлении. Как только проверили кабели, подключенные к аппарату, и оперативники были готовы, вентилятор включили. Я вся сжалась, когда лопасти зажужжали, а на миниатюрный город передо мной обрушился вихрь холодного ветра и ударил мне прямо в лицо. Внутри модели моего здания были установлены тысячи сенсоров, которые определяли, какие силы сжатия и растяжения на них воздействуют, и эти данные передавались на компьютер. Платформу повернули на 15 градусов и весь процесс повторили снова. Таким образом система считала данные о ветрах с 24 разных направлений. За следующие несколько недель инженеры, работающие над проектом, структурировали эти данные и подготовили отчет. Я ввела полученные данные в компьютерную модель своего здания и протестировала его. Моя конструкция безоговорочно выдержала силы ветров, воздействующие на нее по всем направлениям.

Ветер может повредить строение в трех случаях. Во-первых, если над землей постройка слишком легкая, она может перевернуться, как дорожные конусы в грозу. Во-вторых, если почва слишком слабая, то из-за ветра здание может подвинуться и потонуть. Представьте яхту в ветреный день. Сила ветра толкает яхту по воде, и, если вы плывете под парусами, то это как раз то, что нужно. Но вы вряд ли захотите, чтобы из-за ветра подвинулось какое-нибудь здание или мост. Конечно, почва не настолько жидкая, как вода, так что во время грозы вряд ли вы увидите, как к вам плывет какой-нибудь дом (а если это все же произойдет, послушайте совет профессионала: бегите в другую сторону). Тем не менее почва продавливается и движется, и потому инженерам необходимо бросать якорь, то есть укладывать фундамент, чтобы здание осталось на своем месте.

В-третьих, ветер покачивает судно из стороны в сторону. Подобно деревьям, здания имеют свойство покачиваться в зависимости от силы ветра, и это нормально и безопасно. Но, в отличие от деревьев, по зданиям это не так заметно. Башни обычно проектируют таким образом, что максимальная амплитуда их отклонения достигает не более чем одной пятисотой от их высоты, так что 500-метровая башня может отклониться максимум на 1 метр. Если это произойдет слишком быстро, то людей укачает.

Чтобы конструкция не наклонялась, ее нужно сделать достаточно тяжелой. Раньше большинство зданий были относительно скромной высоты, и, так как их строили из камня и кирпича, они оказывались достаточно тяжелыми, чтобы сопротивляться силе ветра. Но чем здание выше, тем сильнее ветер. В двадцатом веке, когда мы начали возводить более высокие и легкие сооружения, то столкнулись с такой силой ветра, с которой уже нельзя не считаться.

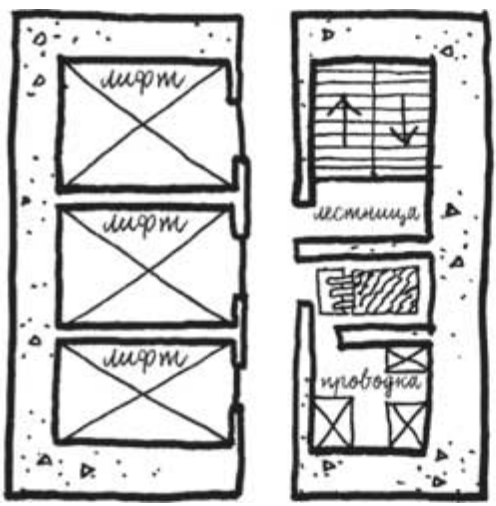
Поэтому при строительстве современного небоскреба одного веса здания уже недостаточно для того, чтобы избежать крена. Вместо этого инженеры ищут способы укрепить постройку так, чтобы противостоять ветру. Если вы когда-нибудь наблюдали, как при сильном ветре гнется дерево и при этом выдерживает такую силу, то уже понимаете, по какому принципу инженерам удается проектировать высотные здания, которые выстоят даже в страшную бурю. Дерево устойчиво за счет крепкого, но гибкого ствола и хорошей корневой системы, а устойчивость здания зависит от его *сердцевины,* сделанной из стали или бетона.




Сердцевина здания, из чего бы она ни была изготовлена, должна стать прочным «стволом» всей постройки, а ее «корни» – достаточно глубоко уходить в землю

Сердцевина здания, как предполагает само название, располагается ближе к середине башни и представляет собой квадратную или прямоугольную конструкцию из стен. Она проходит через середину башни вертикально до самого верха, подобно позвоночнику в человеческом теле. Этажи здания располагаются на несущих стенах сердцевины. Обычно мы ее не видим, потому что она хорошо спрятана, а в ней самой прячутся нужные нам коммуникации: лифты, лестницы, вентиляционные системы, электропроводка и трубопровод.

Когда на постройку воздействует сила ветра, то она распределяется по всей сердцевине. Сердцевина здания устроена подобно трамплину для прыжков в воду – она прочно закреплена с одного конца и свободно двигается с другого. Ее проектируют так, чтобы она была достаточно гибкой и позволяла силе ветра распределяться до самого основания, таким образом стабилизируя сердцевину и все здание целиком, подобно тому, как корни дерева помогают ему выдерживать сильные порывы ветра.




Планировка бетонной сердцевины

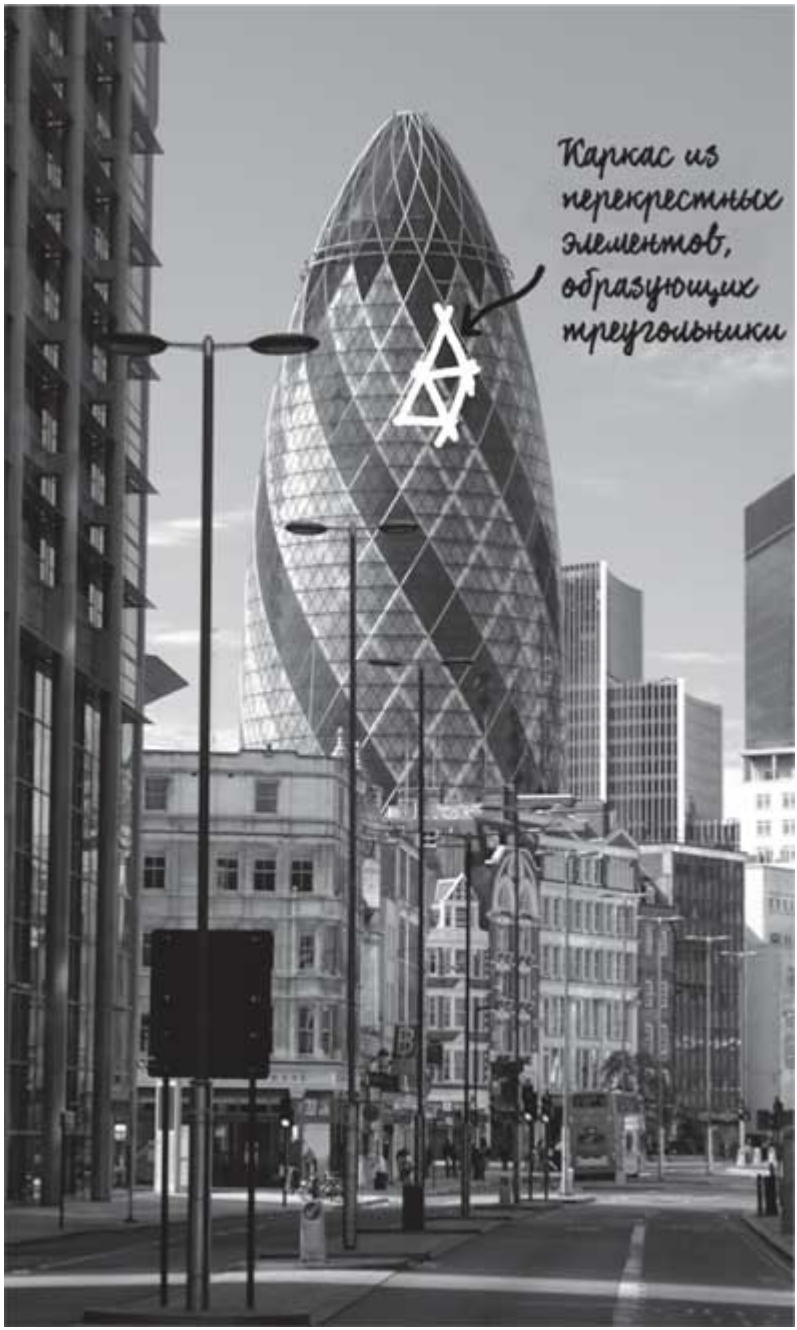
Устройство сердцевины здания, как правило, спрятанной в середине и обеспечивающей пространство для основных коммуникаций

Стены бетонной сердцевины изготавливают из твердого бетона (с отверстиями в определенных местах для лифта и лестничных проемов), благодаря чему она очень прочная. Стальная сердцевина отличается от бетонной: просто заменить бетонные стены на стальные было бы невероятно дорого, и они были бы очень тяжелыми. Из-за самого веса стали такие стены просто невозможно построить. Поэтому вместо сплошных стен из

стали строят конструкции из колонн и балок в виде треугольников и прямоугольников, получая таким образом каркас или вертикальную ферму.

Распределение сил в каждой секции стальной конструкции или в бетонной стене зависит от того, в каком направлении дует ветер. В моей компьютерной модели учтены значения силы ветра по 24 разным направлениям благодаря расчетам в эксперименте с аэродинамической трубой. Силы создают сжатие и растяжение в балках, колоннах и распорках, из которых состоит стальная или бетонная сердцевина здания. Затем компьютер рассчитывает сжатие и растяжение на каждом участке сердцевины с каждой стороны. Потом мы проектируем каждый такой участок из стали или бетона согласно наивысшим значениям сил сжатия и растяжения. Размер стальных деталей и толщина бетонных стен меняется в зависимости от того, какая сила будет на них воздействовать. Таким образом сердцевина обеспечивает устойчивость здания независимо от направления ветра. Проверить и учесть все силы, воздействующие на один участок постройки по 24 направлениям ветра, – сложная процедура, не говоря уже обо всем каркасе целиком. К счастью, в наши дни самую тяжелую работу выполняет вычислительная техника, облегчая тем самым труд инженера.

Здание, расположенное по адресу: Сент-Мери-Экс, 30, в Лондоне. В нем 41 этаж, и оно имеет форму корнишона (за что и получило такое прозвище). Устойчивость этого здания обеспечивается по другому принципу: элегантно изогнутый цилиндр из затемненного синего стекла опоясывают большие стальные нити, переплетающиеся в форме огромных ромбов.

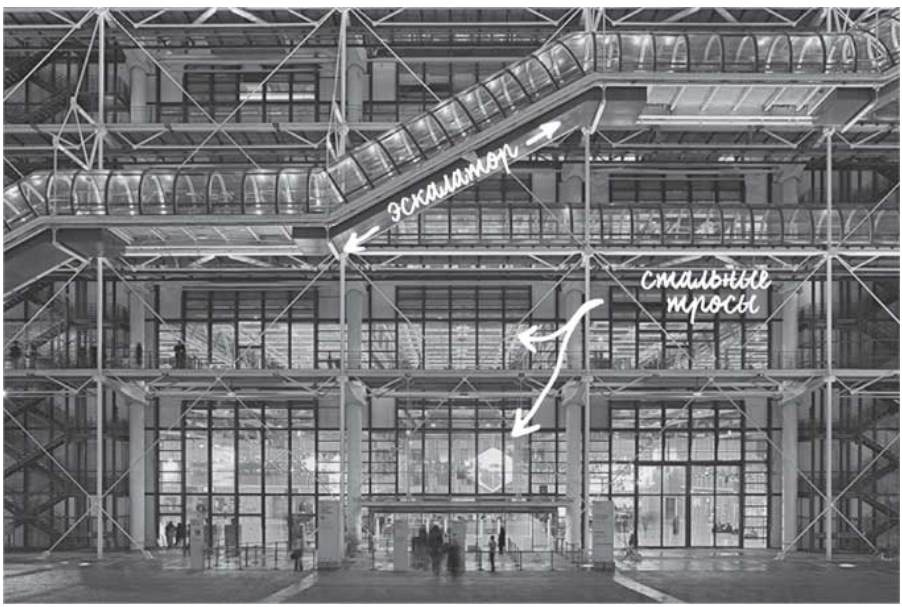



Здание 2012 года постройки по адресу: Сент-Мери-Экс, 30, в Лондоне, также известное как «Корнишон», имеет стальной экзоскелет, защищающий его от воздействия внешних сил

Сердцевина здания, как хребет или позвоночник, придает зданию целостность изнутри, но при строительстве «Корнишона» она оказалась снаружи, как экзоскелет. Такой экзоскелет, или,

если использовать технический термин, *внешний каркас,* или *каркас из перекрестных элементов,* подобен панцирю черепахи. Вместо внутренней структуры, противостоящей внешним силам, пытающимся опрокинуть постройку, это здание защищает его панцирь, или внешний каркас. Когда ветер дует на здание, стальной каркас распределяет его силу и передает в фундамент, обеспечивая устойчивость.

Еще один яркий пример внешнего каркаса – здание Центра Помпиду в Париже. Архитекторы Ренцо Пьяно, Ричард Роджерс и Джанфранко Франкини воплотили проект здания «наизнанку». Все его артерии – то есть то, что обычно прячут, например водопровод и канализационные трубы, электропроводка, система вентиляции и даже лестницы, лифты и эскалаторы, – находятся снаружи. Именно эти детали притягивают взгляд, и их запоминают люди: витые трубы, выкрашенные в белый, синий или зеленый цвета, прозрачную трубу с эскалатором, которая зигзагом заползает наверх. А если присмотреться повнимательнее, можно заметить, что все здание одето в сетку из огромных переплетенных тросов, которые защищают его от ветра. Этакий экзоскелет, скрытый воздуховодами и сточными трубами.




Центр Помпиду в Париже с внешним каркасом, который представляет собой паутину из стальных канатов

Как инженеру-строителю, мне очень нравится видеть и понимать, как устроено здание и как в нем распределяется нагрузка. Вместо того чтобы спрятать или замаскировать,

казалось бы, непривлекательные, но важные системы, благодаря которым здание живет, – выставить их напоказ, как в Центре Помпиду, было восхитительно откровенно, и этот смелый шаг помогает нам лучше понять характер здания.

Однако внешний каркас и сердцевина не только помогают зданию не наклоняться и не опрокидываться – они также отвечают за контроль колебаний. Может показаться странным, что здания, которые выглядят прочными и сделаны из стали и бетона, – движутся, но это и правда так. Сами по себе колебания не представляют проблемы: важна только частота и длительность колебаний. За многие годы экспериментов нам удалось определить уровни ускорения (меру того, как быстро изменяется скорость объекта), на которых люди почувствуют это движение. Возьмем, к примеру, полет на самолете: несмотря на огромную скорость, при спокойном воздухе мы едва ли вообще ощущаем, что движемся. Когда же возникает турбулентность, скорость начинает внезапно и быстро меняться, и мы это чувствуем. Здания очень похожи: они могут достаточно много двигаться, но мы этого не ощутим, если ускорение небольшое. А если оно увеличится, то даже при незначительном движении нас может укачать.

И на нас воздействует не только ускорение. В зависимости от того, как долго здание раскачивается – колеблется или наклоняется из стороны в сторону, – мы тоже можем почувствовать некоторую неустойчивость. Вернемся к аналогии с трамплином для прыжков в воду, когда отталкиваешься от доски и ныряешь, то она еще какое-то время колеблется и только потом останавливается. Если доска толстая и прочно закреплена у основания, то колебания у нее маленькие и длятся недолго. Если доска потоньше и закреплена не так прочно, то колебания у нее гораздо больше и длиться они будут дольше.

Когда я проектирую высокую башню, мне нужно удостовериться, что ускорение колебания выходит за пределы диапазона человеческого восприятия, а само колебание быстро прекращается.

В этой непростой задаче мне помогает все та же компьютерная модель, которую я использую для сопротивления гравитации и ветру. Я ввожу в программу данные о материалах, форме и размерах балок, колонн и сердцевины. Программа анализирует силу ветра, прочность материалов и геометрию всей постройки и выдает данные об ускорении колебания. Если цифры ниже порогового уровня, за которым люди ощутят их, то больше ничего не требуется. Однако если ускорение выше, то строение придется сделать прочнее. Этого можно добиться путем

увеличения толщины стен бетонной сердцевины, а если сердцевина стальная, то с помощью стальных деталей большего размера. Затем я тестирую модель с учетом изменений, иногда по несколько раз, пока не будет достигнуто нужное значение ускорения.

Чем выше и тоньше башня, тем более выраженные у нее колебания. Иногда бывает невозможно упрочнить постройку настолько, чтобы контролировать ускорение колебания и его временные интервалы. Такое здание, хотя и будет совершенно безопасным, не будет давать ощущения безопасности тем, кто находится в нем. В таком случае колебания башни контролируют искусственно с помощью своеобразного маятника, который называют *инерционным демпфером (или инерционным гасителем)* и который движется в противоположную колебаниям сторону.

У каждого объекта, в том числе у здания, есть естественная частота: количество вибраций в секунду при нарушении состояния покоя. Оперная певица может голосом разбить винный бокал, потому что у бокала есть своя естественная частота. Если певица попадет в ноту с той же частотой, что и у бокала, то энергия ее голоса заставит бокал вибрировать с такой силой, что он сам разобьется. Аналогичным образом ветер (и землетрясения) колеблет здания с определенной частотой. Если естественная частота здания совпадет с частотой порыва ветра или землетрясения, то здание начнет сильно вибрировать и пострадает. Это явление – сильные колебания объекта на естественной частоте – называется *резонансом*.

Маятник нейтрализует колебания высотного здания, так как колеблется в противоположном направлении

Маятник – который представляет собой груз, подвешенный на тросах или пружинах, – колеблется туда-обратно. В зависимости

от длины троса или упругости пружины он совершает определенное количество колебаний в единицу времени. При использовании маятника для нейтрализации колебаний небоскреба хитрость состоит в том, чтобы рассчитать частоту небоскреба (по компьютерной модели), а потом установить на вершине маятник с той же частотой. Когда на небоскреб воздействует ветер или землетрясение, здание начинает колебаться туда-обратно. Из-за этого маятник тоже начинает колебаться, но уже в противоположном направлении.

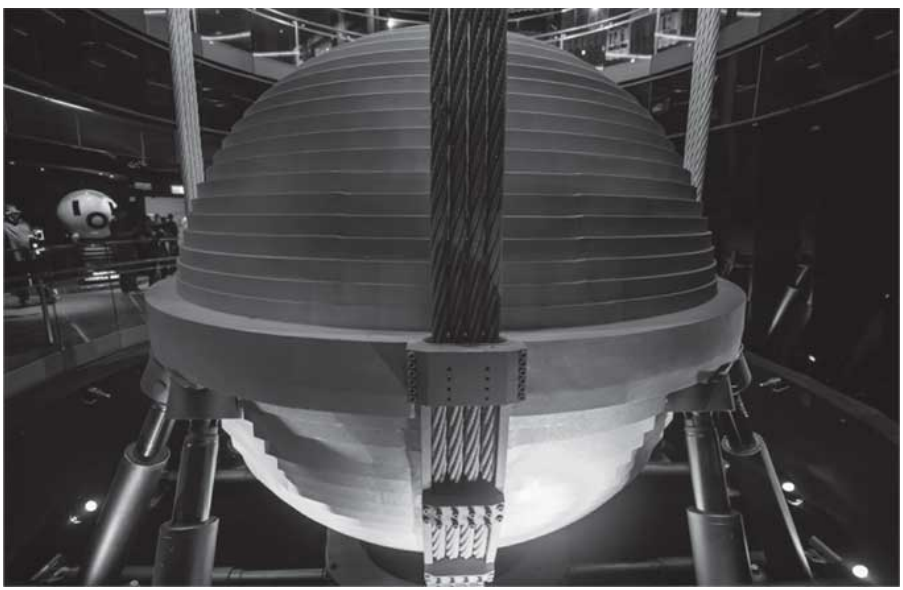
Башня «Тайбэй 101» возвышается на 509 метров и гордо выделяется на горизонте города Тайбэй в Тайване

Мы можем остановить колебания камертона – и его звучание, – просто прикоснувшись пальцем к одному зубчику. Палец нейтрализует энергию колебания. То же самое происходит и в нашем колеблющемся небоскребе. Здание словно камертон, а маятник – это наш палец, который нейтрализует энергию, созданную движением небоскреба, так что колебания становятся

все меньше и меньше, а потом и вовсе затухают. Движение здания словно «гасится» (отсюда и название «гаситель»), и люди в здании его не чувствуют.

Когда в 2004 году завершилось строительство 509-метровой башни «Тайбэй 101» в городе Тайбэй в Тайване, она была самым высоким зданием в мире. Она заслуженно славится своей четкой архитектурной эстетикой: создатели черпали вдохновение в пагодах и стеблях бамбука, а само здание состоит из восьми трапециевидных секций, которые дают ощущение чего-то естественного, природного, как будто башня сама проросла из земли подобно стеблю растения, – и эту иллюзию дополняют зеленые тонированные стекла.

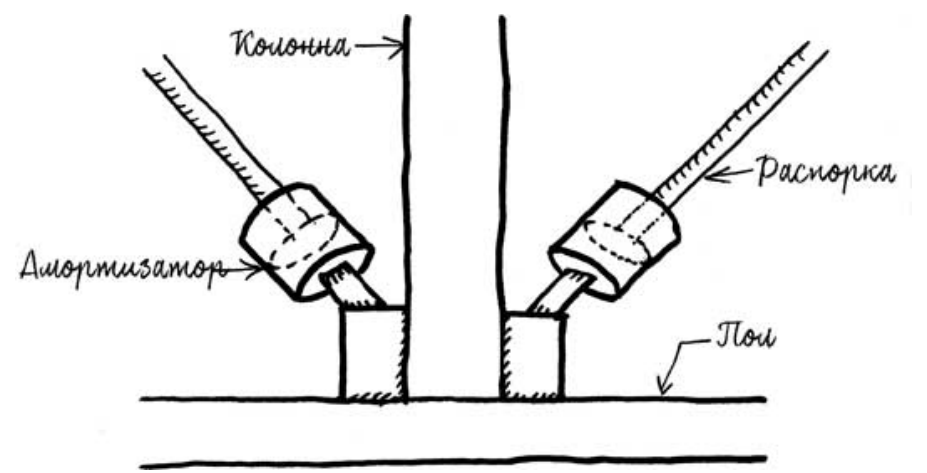
Еще эта башня известна тем, что между 92-м и 87-м этажами в ней подвешен огромный стальной шар. Это маятник весом в 660 тонн – самый тяжелый маятник в небоскребе в мире. Он стал настоящей туристической достопримечательностью (благодаря своему размеру, геометрической элегантности и ярко-желтому цвету, из-за которого он напоминает объект из научно-фантастического фильма), но его настоящая задача – защищать башню от тайфунов и землетрясений, которые могут обрушиться на город. Когда здание колеблется от порывов ветра или землетрясения, маятник тоже начинает колебаться и нейтрализует колебания башни. В августе 2015 года на Тайвань обрушился тайфун «Суделор» с порывами до 170 км/ч, но башня «Тайбэй 101» осталась невредима. Ее спаситель – маятник – поставил рекорд в колебаниях, ширина которых достигла 1 метра.



Маятник в башне «Тайбэй 101» помогает зданию выдерживать

землетрясения

Инженеры используют маятник для защиты от ветра и землетрясения, потому что и ветер, и землетрясения воздействуют на строения случайным образом в горизонтальном направлении. Но у землетрясений может быть больше разрушительных последствий, поэтому нам нужны и другие меры предосторожности. Ужасная разрушительная сила землетрясений породила множество объяснений своему происхождению. В древней индийской мифологии говорится, что земля трясется тогда, когда четыре слона, которые держат ее на своих спинах, двигаются или потягиваются. Согласно скандинавским мифам, земля дрожит, когда Локи (бог озорства, которого заточили в пещеру за злодеяния) пытается вырваться из оков. Японские мифы винят в землетрясениях гигантского сома Онамадзу, живущего под землей в грязи под надзором бога Касимы, который придавил его огромным камнем. Но иногда Касима теряет бдительность, и Онамадзу мечется, сотрясая землю. Сегодня у нас есть менее яркое, но более точное объяснение периодическим вибрациям земли. Землетрясения происходят тогда, когда разные слои земной коры сдвигаются относительно друг друга. Из одной точки идет взрывная волна энергии. Эта точка называется эпицентром землетрясения. Энергия распространяется в стороны от этой точки, и все на поверхности трясется, в том числе наши постройки. Волны энергии от толчков в земной коре, воздействующих на наши здания, непредсказуемы и случайны – они обрушиваются без предупреждения.




Амортизаторы, защищающие небоскреб Торре-Майор в Мехико, Мексика

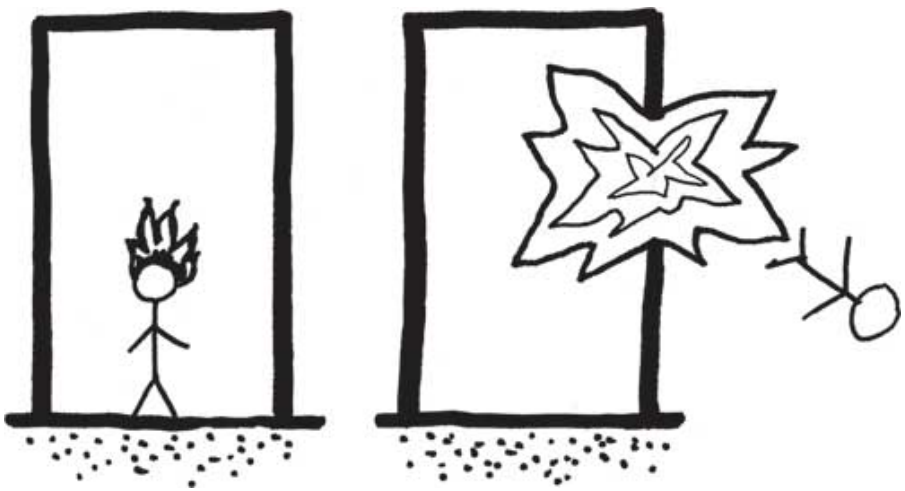
Инженеры изучают частоту землетрясений в исторических записях, а потом с помощью компьютерной модели сравнивают ее с естественной частотой здания, которое собираются построить. Как и в случае с ветром, нам нужно убедиться, что эти частоты не совпадают, иначе здание войдет в резонанс и может повредиться или даже обрушиться. Если они совпадают, то естественную частоту здания можно изменить, если сделать его более тяжелым, или сделать сердцевину или каркас более прочными.

Еще один способ минимизировать ущерб от ударных волн землетрясения – специальные резиновые «подушки», или «подложки». Если сидишь в гостиной, где мощные колонки выдают басы, то чувствуешь, как вибрации идут от колонок в пол, проходят сквозь диван и передаются прямо в твое тело. Если под колонки поместить резиновые подложки, то этот эффект ослабевает, потому что подложки поглощают большую часть вибраций. Аналогичным образом мы можем поместить большие резиновые подложки под колонны здания, и они будут поглощать (амортизировать) вибрации землетрясения.

Энергию землетрясения могут поглощать и соединения между балками, колоннами и диагональными стяжками. В башне Торре-Майор в Мехико для этого используется очень умная система. В этой 55-этажной башне установлено 96 гидравлических демпферов, или амортизаторов – как в автомобиле, – расположенных крест-накрест по всему периметру и по всей высоте (получается каркас из перекрестных элементов), так что они придают зданию дополнительную прочность и защищают от землетрясений. Когда происходит землетрясение, все здание качается, а его движение поглощают демпферы, так что само строение не так сильно движется. Интересно, что вскоре после завершения строительства Торре-Майор в Мехико как раз произошло землетрясение с магнитудой 7,6 балла и нанесло городу значительный ущерб. Башня Торре-Майор осталась цела и невредима. Говорят, что люди, находившиеся в тот момент в здании, даже не поняли, что произошло землетрясение.

В некотором смысле это инженерный идеал – здание настолько хорошо спроектированное и настолько безопасное, что находящиеся в нем люди могут спокойно заниматься своими делами и даже не знать о том, сколько сложных технологий потребовалось для того, чтобы противостоять всем силам, воздействующим на него изо дня в день.

# Глава 3. Огонь



Утром 12 марта 1993 года я, как обычно, отправилась в школу в районе Джуху города Мумбаи, с аккуратно убранными назад волосами, в накрахмаленной белой блузке и сером форменном сарафане. На зубах у меня были брекеты с зелеными резиночками, которые я сама выбрала. Это уж точно было не круто (да, уже в девять лет я была изгоем класса). В два часа дня мама забрала нас с сестрой на лаймово-зеленом «Фиате» и отвезла домой. Пока мама парковалась, мы с сестрой, как обычно, побежали наверх по лестнице наперегонки к нашей входной двери. Но в этот раз что-то было по-другому. Мы остановились на последней ступеньке. Мы не добежали до двери, потому что там стояла наша соседка, нервно теребила в руках дупатту и выглядела ужасно расстроенной.

Вскоре мы узнали почему. Пока мама забирала нас из школы, на Бомбейской фондовой бирже взорвалась бомба, а там как раз работали мой отец и дядя.

В панике мы вбежали в квартиру и включили телевизор. По всем новостным каналам показывали этот хаос. По всему городу взрывались бомбы. Сотни людей пострадали или погибли. Это произошло еще до появления мобильных телефонов, так что мы никак не могли узнать, живы ли мой отец и дядя и находятся ли они в безопасности.

Бомбейская фондовая биржа представляет собой 29-этажную бетонную башню в самом сердце финансового района Мумбаи. В подвал здания въехала машина со взрывчаткой и взорвалась.

Множество людей погибли, еще больше людей получили ранения. Я в ужасе стояла перед телевизором и смотрела на плачущих людей в крови и пыли на экране, которые выбегали из дымовой завесы. К башне мчались полицейские машины, пожарные и машины «Скорой помощи», их сирены ревели. Мы увидели, что офисы на первом и втором этажах здания, находящиеся ближе всего к месту взрыва, полностью разрушены. Было ясно, что в этой части здания никто не выжил. Потрясенные люди с верхних этажей спускались вниз по лестницам и выбегали из здания. Мы смотрели друг на друга и не произносили ни слова, но я знала, что думаем мы все об одном и том же. Мои отец и дядя работали на девятом этаже. Мы молча надеялись на лучшее.

Как мы узнали потом, мой отец сидел у себя за столом и кричал что-то в телефон с плохим соединением одному из своих клиентов, когда сильный взрыв потряс здание. Сначала он подумал, что взорвался электрический генератор или большое охлаждающее устройство. Он вскочил со стула и велел сотрудникам сохранять спокойствие и оставаться на местах. Через несколько секунд он услышал, как люди в ужасе бегут вниз по лестнице. Многие кричали, что это бомба и что нужно как можно быстрее покинуть здание. Мой отец, дядя и их коллеги вышли из офиса и увидели сцены ужаса.

Сотни людей толпой спускались вниз по лестнице. Места почти не было. Отец опустил голову и думал о том, как делает один шаг за другим, стараясь не смотреть на расчлененные тела – руки, ноги, кровь, – разбросанные за лестничными проемами. Наконец он дошел до первого этажа. Машины «Скорой помощи», которые не справлялись с ранеными, перекрыли улицы. Мой отец и дядя покинули территорию биржи, сели на автобус и поехали к моей бабушке. Примерно через два часа после того, как мы пришли домой из школы – самые долгие два часа в моей жизни, – папа позвонил нам и сообщил, что они оба в безопасности.

Много лет спустя, когда я училась в магистратуре по проектированию зданий, мы проходили, как обезопасить высотные здания от взрывов. Вдруг события того страшного дня в марте снова ожили передо мной. Впервые мне в голову пришла мысль: если взрыв произошел прямо в основании здания, а потом там возник пожар, то почему вся башня Бомбейской фондовой биржи не обрушилась?

Теперь я знаю, что этому есть две основные причины. Первая причина в том, что инженеры проектируют здания так, что они защищены от взрывов, так что, даже если здание будет повреждено, оно не обрушится как карточный домик. Существует минимальный стандарт безопасности, которым руководствуются

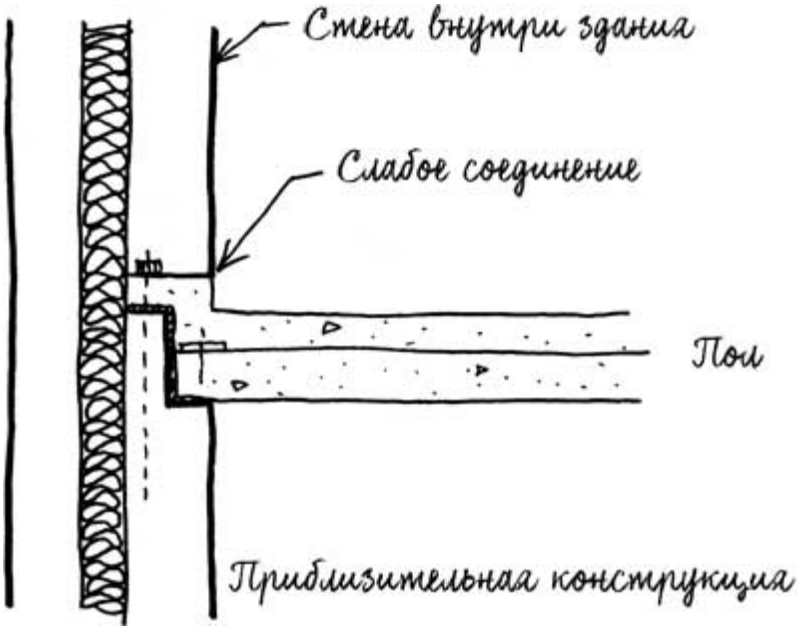
проектировщики *всех* зданий, но самые уязвимые здания – культовые высотные сооружения, например, или те, где больше всего народу, – проектируют особым образом, чтобы защитить их от ряда возможных сценариев взрыва. Вторая причина состоит в том, что все здания проектируют так, чтобы пожар в них не мог распространяться слишком быстро, и люди, находящиеся в здании, могли успеть покинуть его, а пожар могли быстро потушить или запереть внутри одной зоны и не дать разгореться, пока он не нанес значительного ущерба.

Но мы не сразу начали так строить, нам пришлось учиться на катастрофах прошлого.

Проснувшись рано утром 16 мая 1968 года, Айви Ходж пошла на кухню приготовить себе чашку чая. Она включила газовую плиту, зажгла спичку – и в следующую секунду уже лежала на полу и смотрела на небо. Стены ее кухни и гостиной исчезли.

В квартире Айви на 18-м этаже 22-этажного жилого дома в Кэннинг-Тауне в Лондоне произошел взрыв. Это случилось в мирное время в тихом жилом районе, так что событие оказалось для Лондона беспрецедентным и сильно повлияло на все дальнейшее строительство.

Этот дом наспех построили в рамках проекта застройки, столь необходимого после Второй мировой войны. В этом районе около четверти домов разрушились во время бомбежек, а так как после войны население стало стремительно расти, город нуждался в срочном решении жилищного кризиса. Чтобы быстро застроить районы вместительными домами, проектировщики экспериментировали с новыми видами зданий. Этот дом был второй из девяти идентичных жилых башен, входивших в комплекс «Ронан-Поинт».




Некачественное соединение, подобное тому, которое использовали при строительстве «Ронан-Поинт», представляющее собой небольшое количество жидкого бетона между готовыми панелями

Башню наспех соорудили из «сборных конструкций». Вместо того чтобы заливать жидкий бетон в формы прямо на строительной площадке и ждать, когда он затвердеет, чтобы потом строить стены и перекрытия (как того требует большинство бетонных конструкций), бетонные панели в форме готовых комнат изготовили на заводе. Затем их привезли на площадку и собрали вместе с помощью подъемного крана. Это напоминало постройку карточного домика: сначала установили стены первого этажа, на них положили готовые горизонтальные перекрытия, и так до самого верха. Панели соединили между собой на площадке небольшим количеством жидкого бетона. Вес здания распределялся прямо на огромные несущие панели. У здания не было никакого каркаса. Такие панельные здания оказались гораздо дешевле и строились быстрее, да и рабочих требовалось меньше – а все эти экономические факторы оказались решающими в проекте восстановления послевоенной Британии.

В квартире Айви Ходж произошла утечка газа из-за недавно установленной неисправной системы котлов.

Из-за одной спички газ взорвался, и – БА-БАХ! – от дома оторвались угловые панели, из которых состояли стены. Так как панели квартиры внизу лишились опоры, они тоже упали на нижний этаж. И так одна за другой разрушились угловые панели

всего дома, утащив за собой вниз большой кусок здания. Погибли четыре человека, которые спали в своих квартирах.

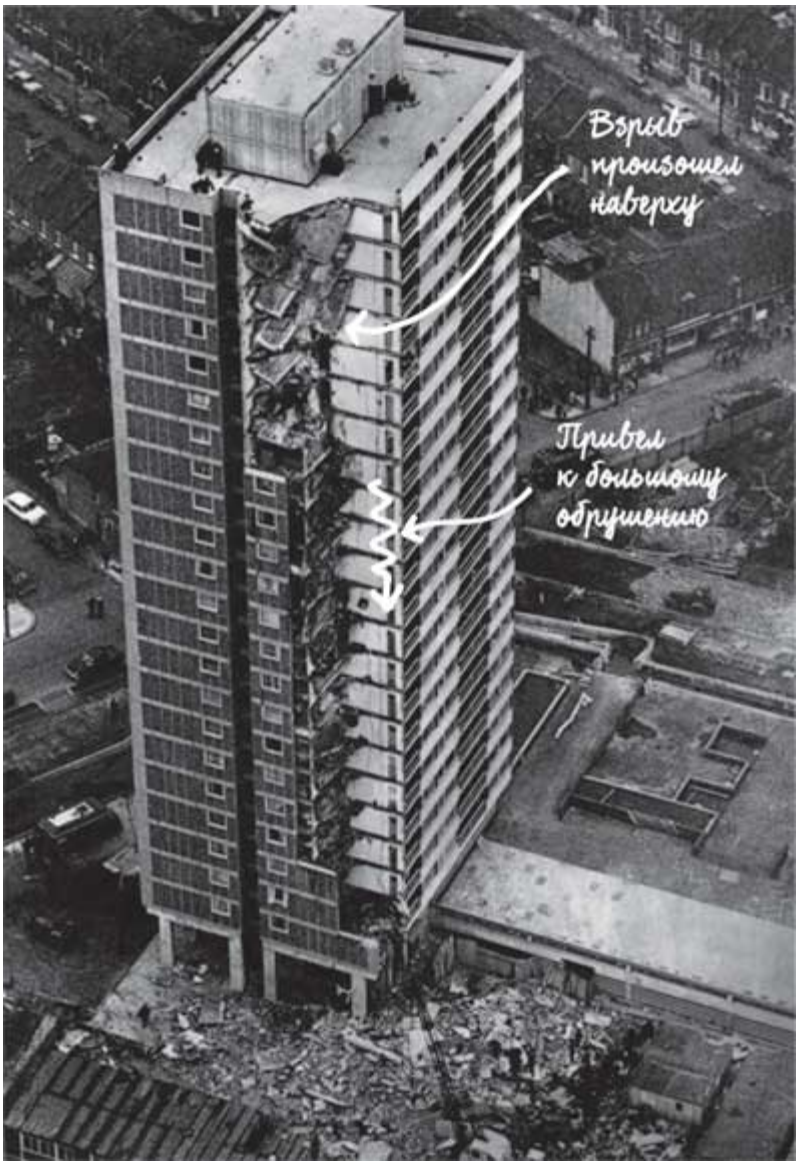
Странно, что взрыв не повредил Айви барабанные перепонки, – и это говорит о том, что взрывная волна была не такой уж и сильной, потому что для повреждения перепонок достаточно совсем небольшой силы. И в самом деле, расследование показало, что, даже если бы взрыв был в три раза слабее, эти бетонные панели все равно разрушились бы. Так как блоки просто стояли друг на друге и не были как следует соединены, ничто не мешало им оторваться и улететь. Проектировщики уповали на силу трения между блоками и на слабенькое соединение из жидкого бетона, которое должно было их скреплять. Этого было недостаточно. Сила взрывной волны, приложенная к стене, была больше сопротивления, которое оказывали сила трения и бетонное соединение, и стена просто отлетела. А так как стенам верхних этажей было больше некуда распределять вес, они попросту упали.

В этом обрушении был еще один интересный факт. Мы ожидаем, что наибольший ущерб нанесет взрыв в основании здания, так как над ним много этажей и все они могут обрушиться. Но в этом случае, если бы взрыв произошел в основании, обрушения могло и не быть.

Трение зависит от веса. Чем тяжелее груз, который давит на соединение двух поверхностей, тем больше между ними трение. Наверху башни (где была квартира Айви) было всего четыре этажа, вес которых был приложен к соединению стен и пола, поэтому сила трения была мала. Сила взрыва оказалась больше силы трения, и потому бетонные панели улетели. Но у основания башни вес более чем двадцати этажей бетонных блоков создавал гораздо большее трение между панелями (по той же причине достать журнал из основания стопки гораздо труднее, чем из ее вершины). Так что, вопреки интуитивным ожиданиям, взрыв в верхней части здания привел к катастрофическим последствиям. Сейчас такое происходит нечасто – в основном потому, что, как мы увидим, здания больше не строят подобным образом.

Трагедия в «Ронан-Поинт» научила будущих строителей двум важным вещам. Во-первых, необходимо соединять части постройки вместе таким образом, чтобы при воздействии какой-либо силы на стену или на поэтажное перекрытие соединения не дали панелям развалиться. (Например, в «Ронан-Поинт» можно было бы соединить готовые панели разных этажей стальными прутьями, и они бы выдержали взрыв. Подобная система соединений используется в современных панельных домах.) Даже при более традиционном способе постройки, когда на

стройплощадке заливают бетон и фиксируют стальной каркас, нужно убедиться, что у всех балок и колонн прочные соединения. В случае со стальным каркасом нужно использовать при его сборке достаточно прочные болты, которые выдержат не только нормальную нагрузку под воздействием ветра и гравитации, но и прочно соединят между собой части конструкции.




Несоразмерное обрушение этажей после взрыва в «Ронан-Поинт» в Лондоне в 1968 году

Во-вторых, инженерам нужно было предотвратить

несоразмерные последствия. В «Ронан-Поинт» из-за небольшого взрыва на 18-м этаже обрушился весь угол здания на всех этажах. Такой эффект домино несоразмерен силе взрыва, и так появился новый термин – *несоразмерное разрушение.* Если происходит, например, взрыв, то, конечно же, он нанесет зданию ущерб, но маленький взрыв на одном этаже не должен повреждать сразу все этажи. Проблемой башни в Кэннинг-Тауне было то, что нагрузке было некуда распределиться. Так что суть в том, чтобы убедиться, что силам есть куда распределяться, даже если какая-то часть постройки вдруг исчезнет. Это все равно что сидеть на стуле: теоретически на каждую из четырех его ножек приходится всего четверть нашего веса. Но если, как и многие люди, вы любите качаться на стуле, то нагрузка на эти две ножки удваивается относительно той, которую предусмотрели проектировщики стула, и ножки могут не выдержать, а вы упадете и ударитесь спиной. Зато если инженеры предусмотрят такое поведение и сделают ножки достаточно прочными для двойной нагрузки, то вы в безопасности.

Таким образом родилась идея сознательно создавать новые пути, по которым может распределяться дополнительная нагрузка. В компьютерной модели я удаляю одну колонну, учитываю увеличение силы, воздействующей теперь на соседние колонны, и проектирую их таким образом, чтобы они выдержали новую нагрузку. Я знаю, что если одну колонну убрать, то соседние все выдержат. Потом я ставлю колонну на место и убираю какую-нибудь другую, и так я тестирую различные варианты и проверяю, сохранит ли моя постройка устойчивость в случае взрыва. Никогда не пытайтесь выиграть у инженера-строителя в «Дженгу»: мы знаем, какие блоки вынимать и как извлечь из постройки детали так, чтобы она не обрушилась.

На протяжении всей истории и инженеры, и власти борются с общим врагом – пожарами, которые грозят сжечь наши города дотла. В Древнем Риме дома часто строили на деревянных каркасах, с деревянными перекрытиями и крышами, из-за чего они легко загорались, потому и пожары там были нередки. Великий пожар Рима в 64 году н. э. уничтожил две трети города. Раньше древесину не обрабатывали ничем противопожарным, а стены сооружали из плетеных прутьев и глины. Плетенку – решетку из узких деревянных реек, напоминавшую плетеную корзинку, – покрывали глиной, а точнее, смесью глины, влажного грунта, песка и соломы. Такая конструкция легко загорается, и пожар по ней распространяется очень быстро. Узкие улочки только усугубляли ситуацию, потому что огонь легко преодолевал небольшое расстояние между домами.

В I веке до н. э. в высших эшелонах римского общества родился Марк Лициний Красс. Он вырос и стал уважаемым генералом (он помог подавить восстание рабов под предводительством Спартака) и известным предпринимателем. Красс был человеком, который всюду видел возможности: наблюдая за тем, какие разрушения приносят римские пожары, он создал первую в мире пожарную бригаду, в которую входили 500 специально обученных рабов. Бригада представляла собой частный бизнес: они мчались к горящему зданию, угрожали конкурирующей пожарной бригаде и прогоняли ее, а затем стояли без дела, пока Красс согласовывал размер платы за тушение пожара с ошеломленными хозяевами дома. Если они не приходили к соглашению, то пожарные просто стояли и смотрели, как дом сгорает дотла. Потом Красс предлагал хозяевам смехотворную цену за их дымящиеся руины. Таким образом он быстро скупил много римской земли и на этом сколотил состояние. К счастью, современные пожарные бригады работают более честно.

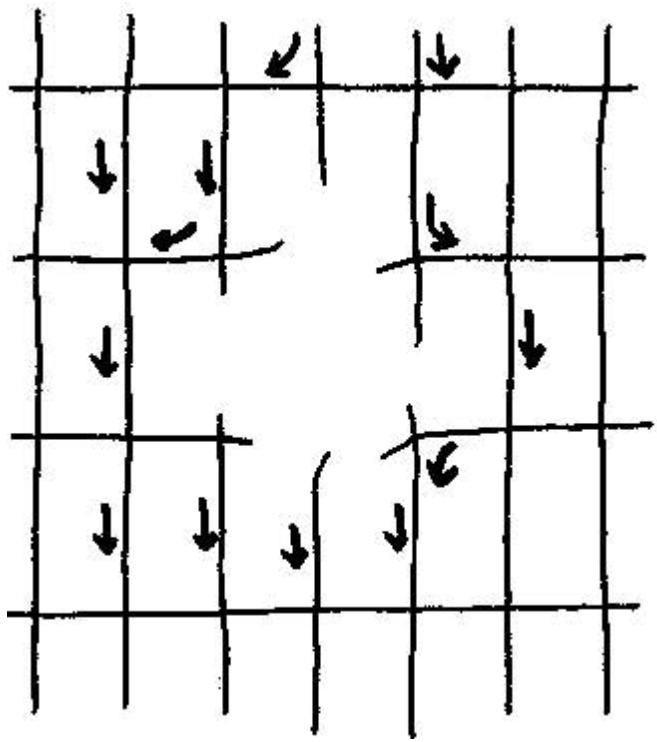
После Великого пожара Рима император Нерон издал несколько важных указов. Он велел расширить улицы, ограничить высоту жилых домов шестью этажами, а пекарни и кузницы строить подальше от жилых районов и помещать их в зданиях с двойными стенами с воздушной прослойкой. Он провозгласил, что балконы следует делать огнеупорными, чтобы легче было бежать из горящего дома, и инвестировал средства в улучшение системы водоснабжения, благодаря которой можно тушить пожары. Римляне извлекли из этой трагедии урок, да и мы с вами только выиграли от их выстраданной мудрости. Тысячи лет спустя те же простые принципы – разделение комнат, квартир и зданий огнеупорными материалами, воздушные прослойки – по-прежнему используются для предотвращения пожаров в современных зданиях.

11 сентября 2001 года мир в ужасе наблюдал, как два самолета врезаются в башни Всемирного торгового центра в Нью-Йорке. Я тогда была на каникулах в Лос-Анджелесе перед началом учебы в университете, а на следующий день должна была лететь в Нью-Йорк. Я сидела и в оцепенении смотрела новости, потрясенная тем, что башни рухнули всего через час после того, как в них врезались самолеты. Через несколько дней я полетела прямым рейсом в Лондон, уже ощущая себя частью изменившегося мира.

Если взглянуть на те чудовищные события с инженерной точки зрения, то они оказали огромное влияние на строительство небоскребов. Когда я читала о том, какие упущения в

проектировании привели к обрушению башен, я с удивлением узнала, что не только сами самолеты привели к разрушениям подобного масштаба, но и последующий пожар.

В Нью-Йорке много потрясающих небоскребов, а башни-близнецы Всемирного торгового центра (открытого в 1973 году) были одними из культовых символов города. Визуально обе башни казались очень простыми – ровные квадраты с высоты птичьего полета высотой в 110 этажей. В каждой башне была массивная сердцевина из стальных колонн. Но этот позвоночник не отвечал за устойчивость башен – для этого на них был особый «панцирь» с функцией экзоскелета.



Нагрузка находит новые точки приложения, и силы распределяются на соседние части каркаса

Вертикальные колонны, расположенные в метре друг от друга по всему периметру квадрата, соединялись балками на каждом этаже. Балки и колонны вместе образовывали прочный каркас, подобный каркасу «Корнишона», который мы рассматривали ранее, только с огромными прямоугольниками вместо треугольников. Соединения между балками и колоннами были очень прочными. Такой внешний скелет защищал здание от ветра.

Когда в башни врезались самолеты, в экзоскелете

образовались огромные прорехи. Они разрушили много колонн и балок. На самом деле инженеры учитывали возможность того, что башню может задеть самолет. Они продумывали, что случится, если «Боинг-707» (самый большой коммерческий самолет на момент постройки зданий) врежется в здание, и производили соответствующие расчеты. Балки и колонны сконструировали с очень прочными соединениями, так что, даже если часть каркаса пострадает, нагрузке будет куда распределиться: она уйдет на *соседние* с повреждением части каркаса (здесь учтен принцип предотвращения несоразмерного разрушения, который инженеры используют после случая в «Ронан-Поинт»).

Самолеты, которые врезались в башни-близнецы, не были «Боингами-707», на основании габаритов которых инженеры делали расчеты за 30 лет до трагедии. Это были более крупные модели «767», и в них было больше топлива. При столкновении топливо загорелось, и из-за состава топлива, деталей самолетов, столов и других горючих предметов в здании стальные колонны раскалились. При нагревании сталь начинает плохо себя вести: крошечные кристаллики, из которых состоит материал, приходят в возбуждение и начинают двигаться, из-за чего прочные соединения между ними расслабляются. Расслабленные соединения делают металл мягким. Поэтому горячая сталь слабее холодной стали и не может выдерживать ту же нагрузку. 11 сентября на колонны, соседние с местами повреждения, пришлась большая нагрузка, потому что на них воздействовала не только та же сила, что и обычно, но и та, которая перераспределилась с их пострадавших соседей. Стальные колонны и горизонтальные балки были обработаны специальной краской с минеральными волокнами, которые защищали сталь от возгораний и перегрева. Но крушение самолета и осколки мусора повредили слой защитной краски, из-за чего большие участки стали оказались незащищенными. Температура колонн по периметру башни поднялась еще выше.

Стальные колонны в сердцевине тоже неестественно перегрелись. От остального здания сердцевину отделяли два слоя гипсокартона (панелей из гипсовой штукатурки, зажатой между двумя плотными листами картона). Смысл был в том, что в случае пожара огонь не сможет проникнуть в сердцевину через эти два слоя, так что люди смогут пройти в безопасную зону и эвакуироваться из здания по лестнице. Но гипсокартон оказался поврежден, из-за чего колонны в сердцевине оказались подвержены огню, и предполагаемый безопасный путь эвакуации оказался заблокирован.

Колонны становились все слабее и слабее, и, когда

температура достигла 1000°C, они не выдержали. Они больше не выдерживали нагрузку и стали гнуться.

В конце концов колонны совсем обрушились, и часть здания над ними оказалась уязвима к воздействию гравитации. Этаж над упавшими колоннами рухнул. А этаж, на который он приземлился, не выдержал такой нагрузки и тоже обрушился. Этажи рушились один за другим, как кости домино, и катастрофа Кэннинг-Тауна повторилась, только в гораздо более поразительных масштабах – этажи обрушились, а за ними и обе башни. Противопожарная защита – краска и слои гипсокартона – не соответствовала масштабам и интенсивности возгорания.

С того дня проектирование небоскребов сильно изменилось. Теперь мы следим за тем, чтобы пути эвакуации были защищены более надежно. Легче всего этого добиться, если строить сердцевину здания из бетона, а не из стали, так что между огнем и безопасной зоной будет не слабая гипсокартонная стена, а прочная бетонная.

Бетон не является хорошим проводником: он плохо проводит тепло, а это значит, что ему нужно больше времени на нагревание. Однако для укрепления бетона в него вставляют стальную арматуру. Вот она как раз хорошо проводит тепло, и это создает инженерам проблемы. При пожаре стальная арматура накаляется, и тепловая энергия быстро распространяется по всей длине прутьев, а бетон вокруг них медленно нагревается. Горячая сталь расширяется быстрее, чем более холодный бетон, из-за чего внешние слои бетона трескаются и лопаются. По этой же причине трескаются стаканы из толстого стекла, если налить в них горячую воду: внутренний слой стекла сильно нагревается и расширяется, а внешний остается холодным, потому что стекло, как и бетон, плохо проводит тепло. Поскольку внутренний слой расширяется и создает дополнительную нагрузку на внешний, внешний слой трескается.

Благодаря экспериментам и испытаниям мы знаем, сколько времени нужно на то, чтобы бетон передал тепло стальной арматуре, и сколько нужно на нагревание арматуры, которая повредит бетон. Поэтому мы помещаем арматуру настолько глубоко в слой бетона, чтобы успеть потушить пожар до того, как внешний слой бетона треснет. Благодаря этому у людей будет достаточно времени, чтобы покинуть здание по эвакуационному пути внутри бетонной сердцевины, а пожарные успеют взять пламя под контроль, пока здание не рухнуло. Чем выше и больше здание, тем дольше эвакуация, и тем глубже сталь должна находиться в бетоне. Всего несколько сантиметров играют важную роль.

Поэтому бетонная сердцевина выполняет двойную функцию: противостоит силе ветра, воздействующей на здание, и предоставляет людям безопасный маршрут эвакуации. Сегодня, даже если для сопротивления ветру используется экзоскелет (что означает, что для этого не *обязательно* строить сердцевину), мы все равно строим внутри здания бетонные стены, чтобы обеспечить надежную эвакуацию. Уровень противопожарной защиты стальных колонн и балок тоже значительно вырос: огнеупорные доски и огнеупорная краска (которая при нагревании расширяется и изолирует металл) сейчас гораздо надежнее, чем прежде. Они предотвращают слишком быстрое нагревание стали, так что она остается твердой.

Извлекать уроки из катастроф – один из фундаментальных принципов инженерии: постоянное совершенствование технологий является частью работы инженера, и таким образом новые постройки становятся лучше, прочнее и безопаснее, чем прежние. Благодаря подобным урокам мы можем предсказать, что произойдет при повреждении колонн, и принять меры, чтобы здание не обрушилось. Бомбейскую фондовую биржу построили так, что, даже несмотря на то, что часть здания в непосредственной близости к взрыву сильно пострадала, нагрузка, которую она несла, перераспределилась на другие его части. Поврежденная зона сохранила устойчивость, потому что была прочно соединена с остальной структурой, так что, в отличие от дома в «Ронан-Поинт», верхние этажи не обрушились вниз. Стальная арматура внутри бетонных стен и колонн сохранила прочность, несмотря на пожар, который разразился после взрыва.

Те уроки, которые инженеры усвоили из истории, и новые строительные технологии, позволяющие предотвратить обрушение в непредвиденных ситуациях, в тот день спасли жизнь моему отцу.

# Глава 4. Глина

Я обожаю выпечку, что, наверное, не удивительно, если учесть, как много общего у выпечки с инженерным делом. Мне очень нравится строгая последовательность действий, которую нужно выполнить, чтобы сконструировать торт. Мне нравится терпеливо и скрупулезно трудиться, потому что иначе не получится нужная форма и текстура. Мне нравится период, когда остается только ждать и надеяться, потому что моя работа окончена, а выпечка медленно принимает нужную форму в духовке. Обычно все это доставляет мне невероятное удовольствие. Но бывают и моменты разочарования и недоумения – как в тот раз, когда я открыла дверцу духовки, ожидая достать вкуснейший перевернутый ананасовый торт, а вместо этого обнаружила там куски сырых фруктов, беспорядочно плавающих в жирном масляном море. Даже если забыть о промокшем основании, все это оказалось непропеченной катастрофой. Проклиная духовку и рецепт (не моя же это вина, в конце концов), я отправила все прямо в мусорное ведро: только продукты перевела, если не считать, что этот случай послужил хорошим напоминанием о том, что в выпечке, как и в инженерном деле, для итогового результата важен правильный выбор материалов, которые сочетаются определенным образом.

При проектировании здания или моста материалы являются одной из моих важнейших забот. Материалы на самом деле полностью меняют само устройство каркаса, то, насколько он заметен, и то, насколько он физически тяжелый и дорогой. Материалы должны соответствовать назначению здания или моста: мне нужно вплести каркас в проект так, чтобы он не испортил архитектурное решение и не мешал людям использовать постройку по назначению. Материалы должны выдерживать стрессы и нагрузку, которая ложится на постройку, и хорошо вести себя при движении и колебании температур. В конце концов, мой выбор материалов обусловливается тем, чтобы постройка как можно дольше просуществовала в данных условиях. К счастью, мои инженерные творения гораздо совершеннее моих пекарских начинаний.

Наука о материалах уже давно мучает людей, и еще с древних времен мы пытались изучить, из чего все состоит. Греческий философ Фалес (ок. 600 г. до н. э.) утверждал, что вода является изначальной составляющей всех вещей. Гераклит Эфесский (ок. 535 г. до н. э.) пришел к выводу, что первичной материей является огонь. Демокрит (ок. 460 г. до н. э.) и его

последователь Эпикур предположили, что все состоит из невидимых частиц, которые сейчас мы называем атомами. В индуизме материю составляли четыре элемента: земля, огонь, вода и воздух, а пятый – *акаша* – охватывал то, что находится за пределами материального мира. Римский инженер Витрувий в труде *«Об архитектуре»* соглашается с тем, что материю составляют те же четыре элемента, и добавляет, что поведение и характер материала зависят от пропорций, в которых в нем содержатся эти элементы.

Сама эта идея – о том, что существует ограниченное количество основных ингредиентов, которые в разных пропорциях могут образовать любой цвет, текстуру, прочность и другие свойства материала, – тогда была революционной. Древние римляне предположили, что в мягких материалах содержится больше воздуха, а в твердых – больше земли. Большое содержание воды придает материалу водостойкость, а хрупкими материалами правит огонь.

Римляне, известные своим любопытством и изобретательностью, манипулировали этими материалами для улучшения их свойств, и так они изобрели бетон. Возможно, у них не было периодической таблицы (пройдет еще какое-то время, пока Дмитрий Иванович Менделеев опубликует ее оригинальную версию в 1869 году), зато они уже знали, что свойства материала зависят от того, в каких пропорциях в нем содержатся элементы, и эти пропорции можно изменить, если воздействовать на материал другими элементами.

Однако люди долгое время использовали в строительстве природные материалы, не меняя их основных свойств. Наши древние предки строили свои жилища из всего, что находили вокруг себя, то есть из доступных материалов, которым можно было легко придавать различную форму. С помощью нескольких простых инструментов они рубили деревья и строили из бревен стены, а шкуры животных связывали и сооружали таким образом палатки.

Если поблизости не было деревьев, люди строили дома из глины. Когда мы усовершенствовали инструменты и стали смелее и изобретательнее, то продвинулись на шаг вперед: мы стали строить деревянные опалубки, чтобы придать глине форму параллелепипедов. Мы обнаружили это, когда дали глине высохнуть на солнце (согласно древнеримской философии, таким образом мы выпускаем воду и с помощью огня отдаем главенство земле), и так стали получаться более прочные блоки. Люди придумали кирпичи.

Около 9000 года до н. э. кирпичи уже использовались в

пустынях на Ближнем Востоке. В глубокой долине реки Иордан в сотнях метров над уровнем моря человек эпохи неолита создал город Иерихон. Жители этого древнего города обжигали вручную слепленные плоские кирпичи из глины на солнце и строили из них дома в форме ульев. Уже около 2900 года до н. э. в Индской цивилизации строились здания из кирпичей, обожженных в печах. Этот процесс требовал мастерства и точности: если кирпич обжигать недостаточно долго, то глина не просохнет должным образом. Если нагревать его слишком сильно и слишком быстро, то он треснет. Но если обжигать его в течение определенного времени и при правильной температуре, то глина становится прочной и водонепроницаемой.

Руины Индской цивилизации археологи нашли в Мохенджо-Даро и Хараппе на территории современного Пакистана. Каждый кирпич в их постройках независимо от размера изготовлен в идеальных пропорциях 4:2:1 (длина:ширина:высота) – и этими пропорциями до сих пор (в той или иной мере) пользуются инженеры, потому что благодаря им кирпичи равномерно просыхают, с ними удобно работать, а площадь поверхности у них подходит для того, чтобы легко соединять их между собой любым клеем или раствором. Примерно в то же время, что и в Индской цивилизации, в Древнем Китае тоже в больших масштабах изготавливали кирпичи. Но пока скромный кирпич стал одним из самых используемых материалов Западной цивилизации, нам пришлось подождать расцвета одной из ее величайших империй.

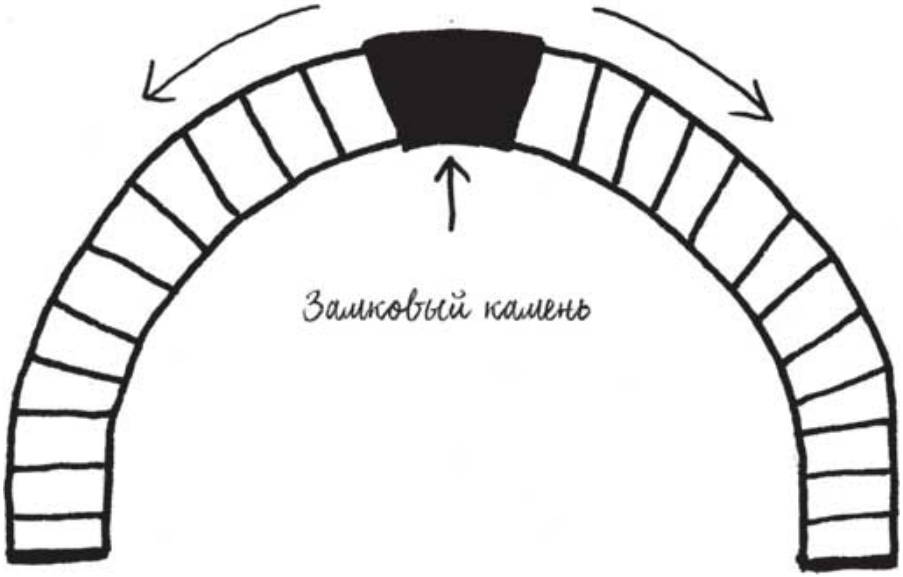
Для меня энергетика и изобретательность древнеримской инженерии служат постоянным источником вдохновения, и к тому же они не перестают меня изумлять. Поэтому я так волновалась, когда ехала на поезде из Неаполя в южном направлении к месту одной из самых известных археологических раскопок в мире. Мы с мужем, надев одинаковые сандалии и подходящие шляпы для сафари, чтобы защититься от палящего летнего солнца, отправились к месту назначения. В ожидании чего-то великого мы зашагали в сторону руин древнего города Помпеи.

Вдоль мощеных улиц расположились прилавки магазинов, испещренных углублениями, в которые когда-то помещали конические горшки, или *амфоры.* На одном полу выложена потрясающая мозаика, изображающая извивающихся рыб и других морских обитателей. На другом – свирепые псы и легендарная надпись «Cave canem», что значит «Осторожно, злая собака». Рядом с ним были прекрасно спроектированные дома, как у Менандра (греческого писателя), с просторным атриумом, термами и садом, окруженным удивительно пропорциональной

галереей с колоннами, или *перистилем.* Все это дает представление о том, каким славным и шумным был этот город в пору своего расцвета.

Среди деталей, которые привлекли мое внимание, были еще кроваво-красные кирпичи. Они были повсюду. Они выглядывали украдкой с колонн, украшения на которых когда-то скрывали их от глаз. Они гордо красовались на стенах, где были выложены тонкими тройными слоями, перемежаясь с контрастными рядами белого камня. Но мои любимые кирпичные конструкции – это, несомненно, арки.

Арки – важная часть зданий. Там они закругленные и имеют форму полукруга, или полуэллипса, или даже параболы. Это очень сильные фигуры. Возьмем, к примеру, яйцо: если попытаться сжать яйцо в руке одним равномерным движением, то сломать его окажется практически невозможно, потому что по изогнутой скорлупе сила сжатия, передающаяся от нашей руки, распределится равномерно, и скорлупа ее выдерживает. Чтобы разбить яйцо, нужно что-то острое, вроде ножа или лезвия, которое будет воздействовать на него только с одной стороны, создавая таким образом неравномерную нагрузку. Когда строишь арку, сила в ней распределяется равномерно по всей изогнутой форме, и все ее части испытывают силу сжатия. В древние времена в строительстве широко использовался камень и кирпич – они отлично выдерживают силу сжатия, но не растяжения. Древние римляне понимали и свойства этих материалов, и удивительные свойства арки, и решили объединить свои знания в удивительно гармоничный союз. До тех пор для преодоления больших расстояний в постройках – мостах и зданиях – использовались плоские балки. Как мы видели ранее, если на балку есть нагрузка, то сверху она испытывает силу сжатия, а снизу – силу растяжения. Так как камень и кирпич плохо справляются с силой растяжения, строители древности использовали большие балки, которые часто оказывались неповоротливыми. Это ограничивало ширину пролетов, над которыми располагается балка. Но с помощью высокого сопротивления камня силе сжатия в арке римляне смогли создавать более прочные и крупные постройки.




Силы распределяются по всей дуге арки. Она постоянно испытывает силу сжатия

Кирпичные арки вокруг меня пережили тысячелетия и заставили вспомнить прекрасную старинную арабскую поговорку «Арки никогда не спят». Они не спят, потому что их детали постоянно находятся под воздействием силы сжатия и с бесконечным терпением сопротивляются нагрузке. Даже когда Везувий изрыгал лаву на Помпеи, душил людей и дома, арки остались стоять на страже города. Пусть их засыпало пеплом, но они так и стоят на своем посту.

Руины города Помпеи свидетельствуют о том, что римляне использовали кирпич почти во всех постройках на завоеванных землях. На территории современной Италии и других стран легионы пользовались мобильными печами для обжига, распространив технологию до самых Британских островов и Сирии. Вы не удивитесь, если узнаете, что у Витрувия уже было свое мнение о материале, который нужен для изготовления идеального кирпича и который он описал в своем труде *«Об архитектуре».* Создание кирпича очень похоже на приготовление торта, так что вот вам моя версия рецепта античного кирпича, предоставленного рядом инженеров античности, который даже я смогла бы приготовить.

РЕЦЕПТ АНТИЧНОГО КИРПИЧА

*Ингредиенты*

Глина

Кирпичи не стоит изготавливать из глины с большим содержанием песка или гальки, потому что из-за этого они получаются, во-первых, слишком тяжелыми, а во-вторых, под дождем такие кирпичи разваливаются, и солома в составе не скрепляет слишком грубый материал.

Лучше делать их из белой меловой или красной глины, или даже из зернистой щебневой глины. Данные материалы мягкие и долговечные, с ними не так тяжело работать, и их легко укладывать.

Вода с фруктами
Жар солнца или печи

*Приготовление*

1. Бросить кусок глины в сосуд с водой глубиной по колено и 40 раз перемесить ногами.

2. Замочить глину в водах сосновой, манговой и древесной коры и в водах трех фруктов и продолжать замешивать в течение месяца.

3. Замешав глину с небольшим количеством воды, придать ей форму с помощью большого деревянного прямоугольника. (Древнегреческий лидийский кирпич – который обычно использовали римляне, согласно Витрувию, – имеет длину 45 см и ширину 30 см.) Как только кирпичи обрели форму, их следует извлечь из деревянных форм.

4. Нагревать глину нежно и постепенно. Если кирпичи изготавливать летом, то они получатся бракованными, потому что жар солнца быстро высушит внешний слой глины, а внутренний слой окажется слишком уязвимым. Высохший внешний слой сожмется больше, чем влажный внутренний, и кирпич треснет. А если изготавливать кирпичи весной или осенью, то они будут высыхать равномерно благодаря более мягкой температуре.

5. Через некоторое время – от двух до пяти месяцев – кирпичи погрузить в воду, а затем вынуть и дать полностью просохнуть.

Ключевым фактором является терпение, так как на полную просушку кирпичей требуется до двух лет. Недавно изготовленные кирпичи еще не полностью просохли, поэтому со временем они могут сжаться в размерах. Если построить из таких кирпичей стену и покрыть ее штукатуркой, то на ней появятся трещины. Витрувий об этом предупреждает: «Это настолько верно, что в Утике при строительстве стен используют только полностью просушенные кирпичи, изготовленные за пять лет до

начала строительства и утвержденные в качестве таковых властью магистрата».

Древнеримские кирпичи в основном были крупнее и более плоскими, чем современные. Они больше напоминали плитку: римляне отдавали предпочтение такой форме, потому что понимали, что с имеющимися инструментами и рецептами более плоские кирпичи будут просыхать более равномерно – а это неотъемлемая составляющая рецепта идеального кирпича. Всюду – от храмов Римского форума до Колизея и невероятной трехслойной арочной системы акведука Пон-дю-Гар, который протянулся над рекой Гардон на юге Франции, – кирпичи составляют основу самых впечатляющих сооружений.

Акведук Пон-дю-Гар над рекой Гардон на юге Франции состоит из трех рядов кирпичных арок

Когда в 476 году пала Римская империя, искусство изготовления кирпичей было утеряно Западной цивилизацией на несколько сотен лет, а затем возродилось в раннем Средневековье (между VI и X веками), когда кирпичи стали использовать в строительстве замков. В периоды Возрождения и барокко (с XIV по начало XVIII вв.) открытые кирпичные стены вышли из моды, и их стали прятать за замысловатой лепниной и фресками. Мне, например, нравятся открытые кирпичные стены, как и неприкрытые трубы воздуховода и лифты центра Помпиду. Я предпочитаю, чтобы мои здания были честными и открытыми: как и в случае с тортами, мне нравится, когда материалы, из которых

они изготовлены, видно глазу (и это никак не связано с тем, что я абсолютно не умею работать с глазурью).

Кирпичная кладка римской арки в городе Помпеи на юге Италии

В Викторианскую эпоху в Великобритании (1837–1901 гг.) и в период между двумя мировыми войнами использование кирпича в строительстве достигло своего пика. Одно из моих любимых зданий в Лондоне – величественный фантазийный готический отель «Сент-Панкрас Ренессанс» Джорджа Гилберта Скотта – яркий пример постройки с открытыми кирпичными стенами. Каждый год в Великобритании изготавливали до десяти миллиардов кирпичей. Кажется, все постройки – от заводов до жилых домов, от канализаций до мостов – делали из кирпича и никак его не скрывали.

Подобные временные масштабы – несколько тысячелетий строительства – и так трудно себе представить. Но ничто не сравнится с временными масштабами образования сырья для изготовления кирпичей. Во время съемок *«Британии под ногами»* – документального фильма в двух частях о земле и о том, что находится под ней, я посетила глиняную шахту на северо-востоке Лондона. Передо мной раскинулась огромная глиняная скала, раскопанная шахтерами под землей прямо под Лондоном. Владелец шахты показал наверх – там глина была цвета ржавчины. «Эта глина новая, ей всего двадцать миллионов лет». По моему ошеломленному выражению лица он понял, что стоит

продолжить рассказ. Он пояснил, что в более «новых» слоях глины гораздо выше содержание железа, которое и придает ей рыжий оттенок. Глина в основании скалы чище, поэтому она голубовато-серого оттенка, а это верный признак того, что эта глина старше.

Под словом «старше» подразумевается, что ей более 50 миллионов лет. Когда-то давно магматические (вулканические) породы выветривались и перемещались под воздействием воды, ветра и льда. Когда скалы и камни двигались, они собирали частицы других минералов – например, кварца, слюды, извести или оксида железа. Эта смесь камней и минералов перемещалась далеко от места происхождения в виде отложений на дне рек, долин и морей. В этих средах рождались, жили и умирали растения и животные, создавая слой органического вещества, который затем покрывался слоем камня, и т. д. Постепенно, за миллионы лет, при нужных температурных условиях и высоком давлении, эти слои превращались в осадочные породы. И именно их выкапывали шахтеры из-под земли. Владелец шахты рассказал мне, что благодаря своему непостижимому возрасту глина полна окаменелых остатков тропических растений вроде мангровых пальм (которые когда-то процветали на территории Британии) и животных – прародителей птиц, черепах и крокодилов, которых на земле уже нет.

Добытую глину используют для многих целей: из нее изготавливают горшки, школьные поделки и, конечно, кирпичи. Для этого ее транспортируют из шахт на заводы, где ее превращают в аккуратные твердые параллелепипеды. Принцип обжигания глины не изменился с древних времен, зато изменился способ приготовления. Сначала мы добавляем в глину дополнительный песок или воду, чтобы придать ей нужную консистенцию, и она становится твердой, но при этом податливой. Затем ее помещают в аппарат, который продавливает ее через форму или прессует (как ручной пресс в детском пластилиновом наборе, только в больших масштабах). Глина приобретает форму длинной прямоугольной колонны, которую потом режут на кирпичи и отправляют в сушилку, чтобы мягко извлечь из нее как можно больше влаги – иначе кирпичи треснут, о чем предупреждал Витрувий. Сушилку устанавливают на относительно низкую температуру в 80–120°C, и в ней достаточно влажно, чтобы кирпичи не пересохли слишком быстро на поверхности, пока внутри они еще сырые. А при просушке они сжимаются.

Если прекратить процесс на этом этапе, то получатся кирпичи античного образца, обожженные в печи. Следующий шаг как раз и

отличает современные кирпичи от древних. Кирпичи обжигают при температуре от 800°C до 1200°C, благодаря чему частицы глины плотно сплавляются друг с другом, и структура материала проходит фундаментальные изменения. Глина превращается в керамику – больше похожую на стекло, чем на высушенную глину. Такой *обожженный* кирпич гораздо долговечнее обычного *высушенного* кирпича, и потому сегодня в строительстве мы используем именно его. Обожженный кирпич довольно прочный: если взять четырех слонов, на которых стоит Земля (и которые виноваты в землетрясениях) из индийской мифологии, добавить еще одного слона на удачу и заставить их встать друг на друга, а вниз подложить один кирпич, то кирпич останется цел и невредим.

Чтобы превратить груду кирпичей в здание, нам понадобится специальный клей или раствор, которым можно соединить кирпичи и превратить их в единое целое. Древние египтяне для этих целей использовали минеральный гипс, из которого получали штукатурку (известную также как парижский гипс, потому что в основном его находили и добывали в районе Монмартр). К сожалению, гипс неустойчив к воздействию воды, так что постройки, скрепленные гипсом, в итоге повредились и разрушились. Но, к счастью, египтяне пользовались и другой смесью с содержанием извести. Она затвердевала и становилась прочнее при высыхании (и впитывала углекислый газ из атмосферы) и оказалась устойчивее гипсовой смеси. Если смесь изготовить правильно, то она придает постройке прочности и служит очень долго: фрагменты лондонского Тауэра построили с использованием известковой смеси, и спустя 900 лет его стены по-прежнему прочные.

В смесь часто добавляют и другие материалы, чтобы добиться различных свойств. В Китае при строительстве Великой стены в смесь добавляли небольшое количество клейкого риса. Рис в основном состоит из крахмала – и благодаря этому смесь прочно скрепляет камни, но при этом обладает некоторой гибкостью, так что она едва ли растрескается, если стена начнет слегка двигаться при нагревании и охлаждении, в зависимости от времени года. Древние римляне добавляли в смесь кровь животных, потому что считали, что это придает ей устойчивости при воздействии мороза. Купол Тадж-Махала скреплен *чуной* – смесью негашеной извести, молотых ракушек, мраморной пыли, камеди, сахара, фруктового сока и яичного белка.

Большинство домов в Соединенном Королевстве сейчас строят из кирпича, потому что это дешево. Но у кирпича есть и свои недостатки. Для укладки кирпичей требуется труд

специалиста, и это относительно медленный процесс. Стандартный размер кирпичей дает мало возможностей при создании форм построек, которые из них создаешь. К тому же кирпичные постройки слабо выдерживают силу растяжения: раствор в соединениях да и сами кирпичи при воздействии силы растяжения могут треснуть. Кирпичи можно использовать только в тех конструкциях, где на них воздействует в основном сила сжатия. Они недостаточно прочны для того, чтобы выдерживать вес высоких зданий (сталь и бетон выдерживают гораздо большую силу сжатия, как мы позже увидим), поэтому они непригодны для строительства высотных зданий и больших мостов. Однако там, где ключевым фактором при строительстве становится низкая стоимость, кирпичи очень популярны. В мире за один год производится примерно 1,4 триллиона кирпичей. На один Китай приходится около 800 миллиардов, а на Индию – около 140 миллиардов. Компания «Лего», например, производит всего лишь 45 миллионов деталек в год.

Этот древний строительный материал, рожденный землей и крещенный огнем, настолько универсален, что его использовали в строительстве пирамид, Великой Китайской стены, Колизея, средневекового замка Тевтонского ордена в Мальборке, знаменитого купола собора Санта-Мария дель Фьоре во Флоренции и даже моего собственного дома. Мне очень нравится думать о том, что в нашем современном, быстро меняющемся мире, со всеми новыми технологиями, мы по-прежнему опираемся на строительный материал, который используется уже более 10 тысяч лет, а изготавливается из пород, которые формировались в земле 50 миллионов лет.

# Глава 5. Металл

В городе Дели в Индии есть железный столб, который не ржавеет. Эта колонна прячется внутри исторического комплекса Кутб – достопримечательности, полной необыкновенных образцов исламской архитектуры. Напоминающая пещеру гробница Илтутмиша, в которой каждый сантиметр стен с арками украшен петлями и завитками, и массивная ребристая башня Кутб-Минар, которая при высоте в 72,5 м является самым высоким кирпичным минаретом в мире, просто захватывают дух. С первого взгляда темно-серая колонна – толщиной со ствол дерева и около семи метров в высоту – кажется незначительной и неуместной, как бродячий кот в зоопарке с экзотическими животными. Но на меня она произвела огромное впечатление.

Эта колонна появилась здесь раньше всех остальных построек. Ее возвел около 400 года один из царей династии Гупта в честь бога Вишну – индуистского бога, который считается Хранителем Вселенной. Изначально на вершине колонны располагалась статуя *Гаруды* (получеловека-полуптицы, на котором ездит Вишну и который, по преданию, может закрыть собой солнце). Раньше люди подходили к колонне, становились к ней спиной и пытались обнять ее руками так, чтобы руки встретились, и это знак удачи, но теперь от рук туристов колонну защищает забор. Меня удача не очень интересовала, но меня поразило еще одно удивительное свойство колонны: несмотря на свои природные свойства, железо не заржавело за полторы тысячи лет.

Железный век пришел на смену бронзовому, который подошел к концу из-за того, что медь и олово, из которых производят этот металл, стало крайне сложно добыть. Считается, что железный век начался около 1200 года до н. э. в Индии и Анатолии (современной Турции). При исследовании руин Кодуманала, небольшой деревушки в центре штата Тамилнада на юге Индии, археологи обнаружили траншею, которая датируется около 300 года до н. э., на юге этой деревушки. Там нашли печь, в которой сохранилось немного железного шлака (побочного продукта, который образуется при выплавке металлов). Индийское железо, которое упоминается в трудах Аристотеля и *«Естественной истории»* Плиния Старшего, славилось своим превосходным качеством. Его экспортировали даже в Египет, где им пользовались древние римляне, но рецепт бережно хранили в секрете.

Железный столб, который не ржавеет, в комплексе Кутб в городе Дели в Индии

Для возведения Железной колонны древние индийцы изготовили диски из железа, которые затем сковали (нагрели и

молотом соединили вместе), а потом выковали внешнюю часть колонны, чтобы она стала гладкой. Железо, из которого соорудили колонну, было необыкновенно чистым, за исключением более высокого, чем обычно, содержания фосфора. Это результат процесса экстракции, который применяли кузнецы. Как раз фосфор и предотвращает ржавение. Ржавчина образуется на железе при воздействии на него кислорода и влаги. Сначала металл должен был подвергнуться коррозии, но в сухом климате Дели на поверхность металла тонким слоем вышел фосфор, который преградил путь ржавчине. Этот слой фосфора не дал воздуху и влаге взаимодействовать с железом. Так что колонна не стала ржаветь. Современную сталь не изготавливают с таким высоким содержанием фосфора, потому что тогда она растрескается при «горячей обработке», которая входит в обычный процесс производства стали и при которой металл деформируется при высоких температурах. Взгляните на постройки из железа или стали, которые подвержены воздействию атмосферы, и увидите, что для предотвращения ржавчины, которая может их повредить, на них наносят краску. А стальные балки и колонны в помещениях, где контролируется подача воздуха, оставляют без краски – если только она не выполняет огнеупорную функцию, – потому что при недостаточной влажности они не заржавеют.

Пока древние народы познавали чудеса железа, из него в основном изготавливали бытовые емкости, украшения и оружие, потому что добываемое железо было слишком мягким для строительства, и люди не знали, как укрепить его настолько, чтобы можно было построить целый дом или мост. Но встречаются и редкие примеры использования железа в строительстве: в *«Записи о буддийских царствах»* китайский монах Фасянь описал висячие мосты в Индии, которые поддерживались железными цепями примерно в то же время, когда в Дели возвели Железную колонну. А в монументальных мраморных воротах в Акрополе в Афинах, или Пропилеях (построенных примерно в 432 г. до н. э.), есть железные прутья, укрепляющие потолочные балки. Так инженеры древности использовали металл: в небольших количествах для укрепления каменных и кирпичных сооружений. Прежде чем железо (и его двоюродную сестренку сталь) начнут использовать в больших масштабах, ученым и инженерам предстоит получше узнать его характер.

Кирпичи и строительный раствор легко трескаются при растяжении, а металлы – нет. Они принципиально отличаются своей молекулярной структурой. Как и бриллианты, металлы состоят из кристаллов – только не таких больших и блестящих,

которые сверкают на платьях гламурных актрис Болливуда. Металлические кристаллы крошечные – они такие маленькие, что невооруженным глазом их не разглядеть, а еще они непрозрачные.

Эти кристаллы притягиваются друг к другу и образуют кристаллическую решетку. Однако, когда металл накаляется, кристаллы колеблются все быстрее и быстрее, пока их связи не ослабнут. Тогда металл становится податливым, и при достаточно высокой температуре его можно даже расплавить до жидкого состояния. Благодаря гибкости связей в кристаллической решетке металлы *пластичны,* а это значит, что они могут в определенной степени растягиваться и деформироваться, при этом не ломаясь. Процесс термической обработки, о котором говорилось выше, помогает убедиться в сохранении данной характеристики. Толстый стальной лист, толщиной, например, в 100 мм, можно раскатать в тонкий лист толщиной до 0,1 мм, и он не порвется (как это обычно происходит, когда я раскатываю тесто). Кристаллическую решетку и связи в ней можно расслабить, придать ей другую форму или сдвинуть.

Еще одно свойство, которое придают металлам эти связи, – *упругость.* Если металл растянуть или раздавить под воздействием силы (определенной величины), то он возвращается в первоначальную форму, когда сила прекращает действовать. Это напоминает явление, когда отпускаешь растянутую резинку, а она возвращается к первоначальному размеру и форме, если только ее не растянуть слишком сильно, чтобы она деформировалась. То же самое может произойти и с металлами.

В сочетании эти характеристики – пластичность, упругость и связи в кристаллической решетке – делают металлы устойчивыми к трещинам. У них появляется особое свойство, благодаря которому они идеальны для строительства: они хорошо выдерживают растяжение. Именно это свойство металлов привело к революции в строительстве. Раньше здания конструировали таким образом, что на материалы воздействовала только сила сжатия, но с началом применения металлов мы стали создавать проекты, в которых действуют большие силы *и* сжатия, *и* растяжения.

Чистое железо хорошо выдерживает растяжение, но плохо справляется с большими нагрузками в крупных постройках, потому что связи в его кристаллической решетке довольно текучи и гибки. Поэтому инженеры прошлого изготавливали из него декоративные колонны, но для несущей функции в сложных проектах железу не хватало сил. Его нужно было каким-то образом укрепить. Кристаллы, из которых состоит железо,

представляют собой решетку, поэтому ученые и инженеры стали искать способы ее упрочнить.

Один из способов это сделать – добавить в решетку дополнительные атомы. Простой (и вкусной) иллюстрацией этому послужит эксперимент, который можно провести у себя дома: если взять много шариков «Мальтизерс» и покатать их ладонью по столу, то можно заметить, что они катаются очень легко. Но если добавить к ним немного изюма в шоколаде, то они уже не будут так легко кататься. Ладно, теперь эксперимент можно съесть, а смысл в том, что «примеси» – изюм – словно путаются под ногами и не дают шарикам «Мальтизерс» перемещаться. Аналогичное явление происходит при добавлении атомов углерода в кристаллическую решетку железа.

Здесь важен баланс. Если добавить слишком мало атомов углерода, то железо будет по-прежнему мягким. Если слишком много, то решетка станет слишком жесткой, потеряет текучесть, и материал будет хрупким, он легко растрескается. Как будто еще недостаточно сложно – в железе и так от природы содержится примесь углерода (и других элементов, например кремния), и иногда его даже слишком много, но его содержание бывает разным, а потому и качество железа тоже разное. Ученым было очень непросто определить точное количество углерода, которое нужно убрать, чтобы железо получилось не слишком мягким, но и не слишком хрупким. В результате их экспериментов получился чугун (который, будучи устойчивым к износу, хорош для изготовления кастрюль, но не используется в строительстве, потому что слишком хрупок, как итальянское *бисквитное печенье*), кованое железо (которого уже почти нет в продаже и напоминающее текстурой роскошные шоколадные чипсы, которые я ела в детстве в Америке), а также сталь. Хотя кованое железо оказалось приличным строительным материалом – из него построена Эйфелева башня, – идеальным компромиссом между прочностью и пластичностью стала сталь. Конструкционная сталь – это железо с 0,2 % примеси углерода. Процесс снижения содержания углерода в железе до 0,2 % сначала был очень дорогим, так что, пока кто-то не додумался до способа дешевого производства стали в промышленных масштабах, ей не удавалось произвести фурор в строительстве. Инженер Генри Бессемер наконец решил эту давнюю проблему и произвел революцию в изготовлении стали, что способствовало развитию железных дорог во всем мире и позволило нам начать строить дома до неба.

Энтони, отец Генри Бессемера, управлял фабрикой по производству гарнитур для печатного станка, которые держал за семью замками. Такие меры были необходимы для того, чтобы

конкуренты не узнали его секретов, но юный Генри часто проникал туда и пытался их разгадать. Понимая, что непослушный сын непреклонен в своем намерении изучать его дело, Энтони уступил и стал обучать его работе на фабрике. В 1828 году Генри исполнилось пятнадцать, он окончил школу и стал работать с отцом. Он обожал свою работу: преуспел в металлообработке, обладал природным талантом к рисованию и вскоре стал делать свои собственные изобретения.

Во время Крымской войны (1853–1856 гг.) Генри Бессемер занялся оружием, которое французы и британцы использовали в сражениях с русскими. Главным недостатком ружей было то, что из них можно было сделать всего один выстрел, после чего их нужно было перезаряжать. Удлиненный патрон, в котором помещалось больше взрывчатого вещества, казалось, улучшит положение, поэтому Генри стал тестировать это новшество в саду у своего дома в Хайгейте, на Севере Лондона (к большому неудовольствию своих соседей). Однако британских военных руководителей его проект не заинтересовал, и тогда он показал его французскому императору Наполеону Бонапарту III и его офицерам.

Новые патроны произвели большое впечатление, но офицеры заметили, что из-за дополнительного взрывчатого вещества хрупкие чугунные ружья могут взрываться. Для таких ружей патроны слишком велики. Бессемер не согласился: проблема ведь была в ружьях, а не в патронах, поэтому поставил себе задачу придумать лучший способ изготовления ружей.

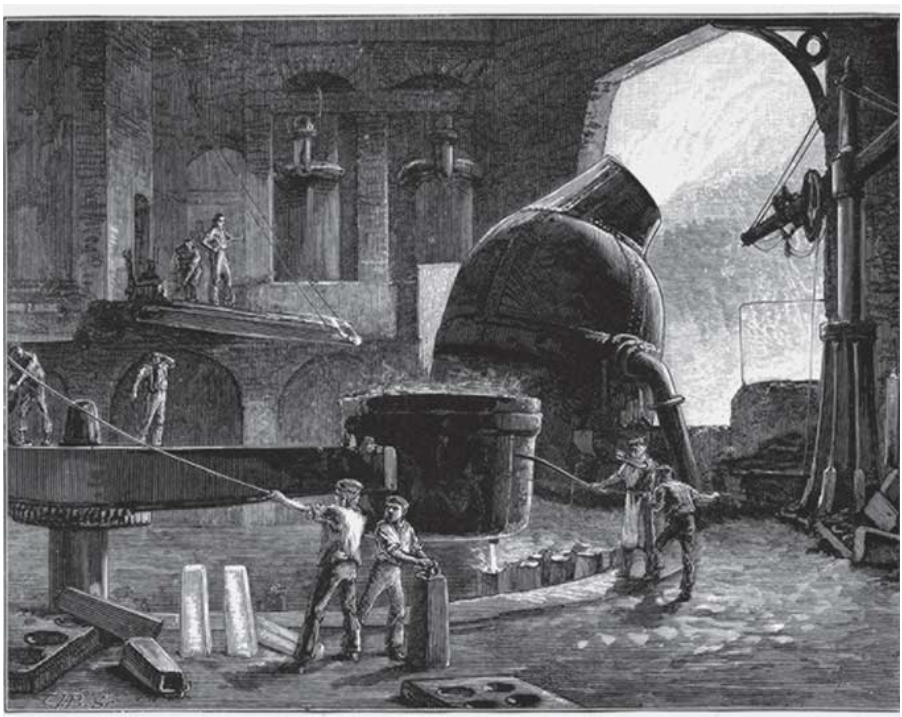
Он решил улучшить качество железа, отливая его другим способом. Он официально приступил к экспериментам с железом, которое отливал прямо в печи у себя дома, но изобретение, по-настоящему сделавшее ему имя, произошло почти по ошибке.

Однажды в своей мастерской Бессемер нагревал в печи куски железа. Несмотря на максимальный нагрев, несколько кусочков на верхней полке отказывались плавиться. Бессемера это расстроило, и он стал нагнетать горячий воздух в верхнюю часть печи, а затем пошевелил кочергой куски железа, чтобы узнать, расплавились ли они наконец. К его величайшему удивлению, они оказались не такими хрупкими, как чугун, а пластичными и гибкими. Заметив, что это как раз те куски, что находились ближе всего к потоку горячего воздуха, Бессемер понял, что кислород воздуха, должно быть, среагировал с углеродом и другими примесями железа и удалил их из металла.

До того момента все пытались очистить железо от примесей, нагревая его на углях и другом топливе в открытой печи. Бессемер решил использовать закрытую печь с проходящим через

нее потоком теплого воздуха, без какого-либо топлива. По сути, нагревание происходит за счет горячего воздуха, который нагнетается в емкость с крышкой, в отличие от нагревания в открытой кастрюле на газовой конфорке. Кажется, что горящий газ создает больше тепла, чем горячий воздух, но это не так.

Бессемер, должно быть, с опаской наблюдал, как из печи полетели искры, когда началась химическая реакция. Потом в печи начался настоящий ад: в ней тут и там происходили маленькие взрывы, от которых разлетались капли расплавленного металла. Он даже не мог подойти к этой машине, чтобы ее выключить. Спустя десять минут кошмара взрывы прекратились. Бессемер обнаружил, что в результате в печи осталось чистое железо.



Бессемеровский процесс: метод производства стали, который использовался в промышленных масштабах и привел к радикальным изменениям в строительной отрасли

Адские взрывы в печи были результатом *экзотермической* реакции – химической реакции, в ходе которой выделяется энергия (обычно в виде тепла) при окислении примесей. Когда кислород тихонько поглотил примесь кремния, он среагировал с углеродом, в результате чего выделилось огромное количество тепла. От этого тепла железо нагрелось куда больше, чем это

могла позволить сама печь, так что Бессемеру не нужны были дополнительные источники тепла.

Чем горячее становилось железо, тем больше примесей загоралось, а эта реакция, в свою очередь, еще сильнее нагревала железо, в результате чего загоралось еще больше примесей. Такой позитивный цикл создавал чистое расплавленное железо.

Теперь можно было работать с чистым железом, и Бессемеру легко удалось добавить в него нужное количество углерода, чтобы создать сталь. До этого изобретения запредельные затраты на производство стали позволяли использовать ее только для изготовления ножей и кухонной утвари, а также пружин, и на этом все. Бессемер преодолел эту невероятную преграду.

Он представил свою работу на совещании Британской ассоциации в Челтнеме в 1856 году. Процесс изготовления стали вызвал большой резонанс, так как он позволял производить ее в шесть раз дешевле, чем все остальное. Бессемер получал десятки тысяч фунтов от заводов по всей стране за право использовать его процесс в производстве. Но тот факт, что он не понимал химии процесса, чуть его не погубил.

Когда другие производители попытались воспроизвести его метод, у них ничего не вышло. Они разозлились на него за то, что потратили уйму денег на лицензию, и подали на него в суд, а ему пришлось вернуть им все деньги. Следующие два года он пытался разобраться, почему процесс прекрасно проходит в его кирпичной печи, но не получается в других. Наконец он разгадал секрет: в железе, которое он использовал, была очень незначительная примесь фосфора. А его коллеги использовали железо с высоким содержанием фосфора, которое, очевидно, не проявляет подобных свойств в кирпичной печи. Бессемер стал экспериментировать с печами и пришел к выводу, что ответ кроется в замене обычного кирпича на известковый.

Однако недоумение и финансовые потери, которые вызвал оригинальный процесс Бессемера, привели к всеобщему недоверию, так что на этот раз ему уже никто не поверил. Наконец он решил открыть свой собственный завод в Шеффилде для массового производства стали. На опровержение подозрений ушло еще несколько лет, а потом заводы начали изготавливать сталь в промышленных масштабах. К 1870 году 15 компаний производили 200 тысяч тонн стали в год. Когда Бессемер умер в 1898 году, во всем мире производилось уже 12 миллионов тонн стали в год.

Сталь высокого качества преобразила железнодорожную сеть, потому что рельсы теперь стало можно производить быстро и дешево, а служили они в десять раз дольше, чем железные

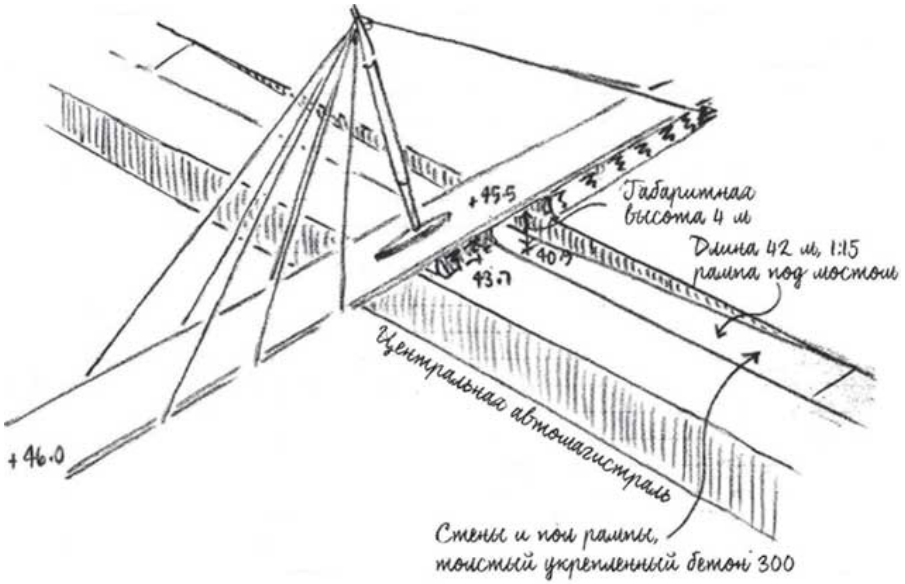
рельсы. В результате начали строиться более крупные, тяжелые и скорые поезда, и в транспортных артериях закипела новая жизнь. Благодаря более низкой стоимости сталь начали применять в строительстве мостов и зданий, которые выросли до небес.

Без бессемеровской стали я не смогла бы спроектировать пешеходный мост Нортумбрийского университета, основанный на способности стали выдерживать силу растяжения. Этот мост – мой первый проект, к которому я приступила сразу после окончания университета. Я все так же ясно помню первый день на работе, когда я ехала в переполненном метро на Ченсери-лейн в Лондоне, и как толпа спешащих на работу пассажиров в офисных костюмах буквально подхватила меня и вынесла на станцию. Я волновалась, нервничала и ощущала себя в деловой одежде очень неловко, шагая по тротуару к месту назначения – пятиэтажному офисному зданию, облицованному белым камнем.

Моим новым начальником стал Джон, стройный мужчина среднего роста, с прямыми короткими темными волосами, в очках без оправы и со страстной любовью к крикету (до которой мне, хоть я и выросла в Индии, было очень далеко). Мы заполняли документы, и процесс этот иногда оживляли его ироничные и забавные замечания. Однако я умолчала о том, что сегодня мой 22-й день рождения. Затем он показал мне эскиз нового пешеходного моста, который собирались построить в Ньюкасле. Уверенные отметки карандаша показывали, что на восточном конце моста высокая башня будет поддерживать три пары тросов. Тросы, в свою очередь, будут поддерживать основное полотно моста. Чтобы уравновесить нагрузку, которую вес моста оказывает на эту башню, сзади ее будут держать еще несколько тросов. Мы сидели там с Джоном и рассматривали эти рисунки, и я тихонько ликовала. Как по мне, так это лучший подарок на день рождения, который только может получить девушка. Меня просто переполняли эмоции, оттого что моим первым проектом станет такая элегантная и необычная постройка. И, помимо очаровательной эстетики этого моста, в нем было несколько нюансов, которые делали его в моих глазах еще прекраснее.

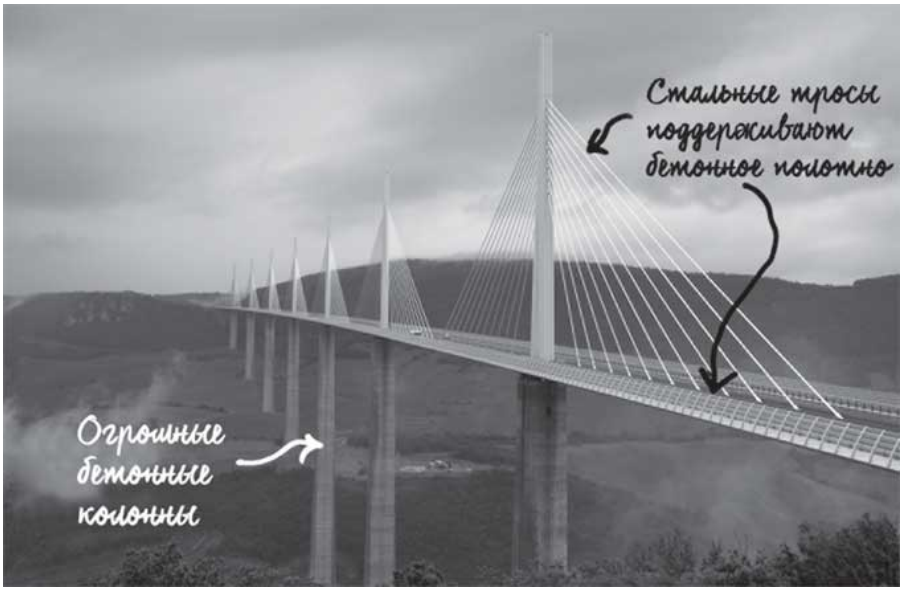
Этот мост – вантовый. Есть еще один известный пример мостов такого типа – Виадук Мийо во Франции. Его слегка изогнутое полотно поддерживают семь столбов, от которых расходятся тросы, образуя паруса и создавая впечатление, что мост парит в 270 метрах над долиной реки Тарн. У вантовых мостов одна или несколько высоких колонн, к которым крепятся тросы. Полотно стремится вниз под воздействием гравитации, а тросы тянут его наверх и таким образом постоянно испытывают силу растяжения. Сила растяжения передается от тросов колонне.

Колонна, в свою очередь, испытывает силу сжатия, которая передается в основание моста. Основание распределяет силы и передает их земле.




Рабочий эскиз пешеходного моста Нортумбрийского университета руки Джона Паркера

Для свежеиспеченного инженера проектирование тросов моста Нортумбрийского университета (которые, кстати, толщиной с мой кулак) стало настоящим вызовом. Если взять металлическую линейку и представить, что это стальное полотно, а три пары резинок приладить вместо тросов, то окажется, что их нужно натягивать со строго определенной силой, чтобы они все пришли в одинаковое растяжение и равномерно поддерживали линейку. Если слишком сильно натянуть резинки с одной стороны, то полотно опрокинется набок. Если слишком сильно натянуть пару резинок в середине, то мост выгнется вверх. А теперь представьте, что это может произойти и с настоящим большим мостом.




Виадук Мийо во Франции – элегантный пример вантового моста

В специальных компьютерных программах я создала трехмерную модель тросов, идущих под мост, и тросов, натянутых между полотном и мачтой. Затем я смоделировала воздействие гравитации. Кроме того, я учла вес всех людей, которые будут находиться на этом мосту, притом что они могут собираться группами то в одной, то в другой части моста. Например, во время Большого северного забега, когда атлеты пробегают по трассе под мостом, толпы болельщиков теснятся с одной стороны моста, встречая их, а потом переходят на другую сторону, чтобы посмотреть, как они убегают. Мне нужно было продумать «вероятностную нагрузку», и я смоделировала людей, которые образуют разные группы на разных сторонах моста. Независимо от того, где стоят люди, тросы должны сохранять растяжение, чтобы поддерживать полотно. Если тросы потеряют растяжение, то станут гибкими, и полотно потеряет поддержку. Чтобы этого не произошло, я искусственно добавила тросам растяжения.

Тросы можно натянуть сильнее с помощью разъема, который представляет собой трубку с застежками с обеих сторон. В каждом тросе есть как минимум один промежуток, куда можно установить такой разъем. Застежки съедают немного троса с обеих сторон промежутка. Можно установить разъем так, чтобы он стягивал концы ближе (чтобы сильнее натянуть трос) или дальше друг от друга (чтобы его расслабить), и таким образом ими можно регулировать величину силы, воздействующей на

трос. Если рассмотреть тросы, которые веером расходятся от мачты на моем пешеходном мосту, то можно увидеть на них места соединения, которые немного толще самих тросов: это как раз те места, где временно были установлены разъемы. Принцип такой же, как если бы мы заменили резинки в нашем домашнем эксперименте на более короткие, а потом натянули бы их до той же длины, что и первые. Так они растянутся сильнее, и сила растяжения в них будет больше.

Секрет постройки вантового моста содержится в балансе. Если взять тонкую картонку и сделать из нее полотно, подвесив на резинках, то она попросту полетит вверх. Если вместо картонки положить книгу, то резинки придут в растяжение, не деформируя книгу. Как только мы отрегулируем вес и прочность полотна и откалибруем растяжение тросов, можно измерить силу, приложенную к тросам. Когда я выполняла чертежи моста, то делала пометки, где указывала, насколько нужно натянуть каждый трос, чтобы он не ослаб.

Работа инженера очень напоминает вращение тарелочек. Нужно одновременно предусмотреть множество проблем и проконтролировать их решение. Возьмем, к примеру, температуру: как и на многие постройки, на мой мост она тоже влияет. В течение года при разных температурах (в зависимости от времени года) он нагревается и охлаждается. У стали есть «коэффициент теплового расширения», равный $12 \times 10^{-6}$. Это означает, что с каждым градусом изменения температуры каждый миллиметр стали расширяется или сжимается на 0,000012 мм. Кажется, что это очень мало, но длина моего моста – около 40 м, а колебания температуры предусмотрены в диапазоне 40 градусов. Здравый смысл подсказывает, что лето в Великобритании жарче зимы не на 40 градусов, и это верно, но сама сталь нагревается гораздо больше воздуха, когда поглощает тепло от солнца. Так что это диапазон температур для стали, а не для воздуха, и мы предусмотрели самые экстремальные (но разумные) их колебания.

При таких показателях расширение достигает около 20 мм. Если бы я закрепила концы моста так, чтобы им было некуда расширяться и сжиматься, то на полотно при нагревании действовала бы большая сила сжатия, а при охлаждении – сила растяжения. Проблема в том, что за всю жизнь моста сжатие и растяжение происходит тысячи раз, и постоянное чередование сил повредило бы не только полотно, но и опоры с обоих концов.

Чтобы этого не произошло, с одной стороны я оставила мосту пространство для движения. (У мостов гораздо большего размера и мостов с большим количеством опор такие «суставы»

располагаются в нескольких местах. Иногда их можно почувствовать, если ехать по мосту на машине.) Так как движение на мосту относительно небольшое, для его амортизации я использовала резиновые опоры. Стальные балки, образующие полотно, установлены на этих опорах размером примерно 400 мм в ширину, 300 мм в длину и 60 мм в толщину. Когда сталь сжимается или расширяется, опоры меняют форму и дают мосту двигаться.

Инерционный демпфер, похожий на демпферы пешеходного моста Нортумбрийского университета

Кроме того, мне нужно было учесть вибрацию и резонанс. Я уже объясняла, как землетрясение может заставить здание резонировать, на примере того, как оперная певица может разбить винный бокал, если возьмет нужную ноту. При проектировании моста меня интересовал вопрос, может ли резонанс моста заставить пешеходов почувствовать себя неуютно. Тяжелые мосты, например бетонные, как правило, не страдают от этой проблемы, потому что при таком весе не так-то просто заставить их вибрировать. Но стальное полотно легкое, и его естественная частота близка к частоте движущихся пешеходов, а значит, есть опасность, что мост войдет в резонанс. Поэтому к нижней части полотна с помощью сильных пружин мы присоединили настроенные на нужную частоту массивные

амортизаторы. Принцип их работы схож с гигантским маятником в башне «Тайбэй» – они поглощают колебания и не дают полотну сильно вибрировать. Эти амортизаторы не видно, если только не присмотреться к полотну повнимательнее, стоя на дороге под мостом (пока делаешь растяжку во время Большого северного забега, например). Так вы заметите три объекта в стальных ящиках, которые прячутся между ярко-синими балками.

Как только я убедилась, что в последней конфигурации мост сохраняет стабильность, я приступила к разработке метода его постройки. Так как он слишком большой для транспортировки в Ньюкасл в готовом виде, я отправилась на сталелитейный завод в Дарлингтоне. На фоне водопада искр, летящих от сварки, мы обсудили несколько возможных вариантов. Нам нужно было доставить детали моста на стройплощадку на грузовиках, поэтому мы хотели разделить его на несколько секций и продумать, как эти секции установить и безопасно подпереть, пока не натянут тросы. Таким же образом нужно продумывать, как подпереть скульптуру, пока она не полностью собрана.

Кроме того, нужно было принять во внимание, как минимизировать неудобства для населения. Так как мост проходит над автомобильной дорогой, мы решили, что лучшим решением будет разделить его на четыре части и привезти их на стройплощадку, затем соединить, а потом с помощью подъемного крана установить на место. Для этого мы взяли гигантский, буквально монстроподобный, подъемный кран.

Благодаря нескольким месяцам планирования установка моста прошла без сучка без задоринки. Сначала сам кран прибыл на место по частям, а было это в начале праздничных выходных, и, пока его собирали, дороги перекрыли. Тем временем из Дарлингтона на ближайшую парковку доставили четыре стальные секции моста, и там их собрали, как детали пазла, и получилось полотно.

Мы планировали установить стальное полотно на место, а потом присоединить тросы. Я спроектировала полотно таким образом, что для сопротивления собственному весу и весу пешеходов нужны все три комплекта тросов. Это значит, что, пока тросы не натянули, во время стройки полотну нужна дополнительная опора, поэтому я также рассчитала, что полотно выстоит, если поставить дополнительную опору посередине (нагрузка на мост была меньше, потому что пешеходный проход на него был закрыт). Мы поставили временную стальную колонну на разделительной полосе автомагистрали.

Автомагистраль перекрыли. Кран взялся за работу. Полотно подняли с парковки и поставили на место, где его концы

поддерживали временные бетонные опоры, а посередине его подпирала стальная колонна. Затем полотно отцепили от крана, а движение по трассе открыли. Все эти сложные манипуляции заняли всего три дня.

За следующие несколько недель мост собрали целиком. Мачту поместили на свое место с помощью крана, а затем прикрутили к бетонному основанию болтами. Потом все важные тросы закрепили попарно, начав с одного конца моста. Каждый раз, когда подсоединяли новую пару тросов, их растяжение регулировали с помощью разъема. Как только они все оказались на месте и последний из них отрегулировали, автомагистраль снова перекрыли, убрали временную стальную колонну, и мост был готов.

Обычно я не в восторге от ранних подъемов, но в тот день я вскочила в пять утра и поехала в Ньюкасл посмотреть на свой готовый мост, который уже открыли для пешеходов. Сначала я сделала малюсенький шаг на мост, но мне показалось, что это был гигантский прыжок, а потом я несколько раз прошла по мосту туда и обратно. Я бегала и прыгала. Прочные стальные балки, тугие тросы, резиновые амортизаторы, инерционные демпферы – все они напомнили мне о том времени, всего несколько месяцев назад, когда я их так кропотливо проектировала. Детали, которые, наверное, никто, кроме меня, не разглядел бы, приводили меня в восторг.

На одном конце моста стояла скамейка. Я уселась на скамейку и какое-то время, довольно улыбаясь, наблюдала за тем, как студенты с затуманенными взглядами ходят по мосту с одной лекции на другую, и никто из них и не догадывался о том, как приятно ощущать свой первый физический вклад в этот мир.

# Глава 6. Камень

Я глажу рукой бетон. У других бывает непреодолимое желание погладить котенка или потрогать музейный экспонат, а мне нравится бетон. Причем не важно, гладкая и ровная у него поверхность, или шероховатая с камешками, или даже намеренно грубая – мне хочется понимать, какова его текстура на ощупь, холодная она или теплая. Так что вы можете себе представить, что я чувствовала, когда приехала в Рим и увидела у себя над головой тонны античного бетона, который было никак не достать.

Пантеон на Пьяцца-делла-Ротонда в Риме – одно из моих любимых зданий. Его построили при императоре Адриане около 122 года (примерно в то же время, когда он строил стену между Англией и Шотландией), и с тех пор он твердо стоит на земле, переживая разные эпохи: сначала он был храмом римским богам, затем христианской церковью, еще усыпальницей, – правда, варвары вынесли из него все, что смогли, а Папа Урбан VIII даже переплавлял потолочные панели в пушки. У входа нас приветствует треугольный фронтон на портике с шестнадцатью коринфскими колоннами. Внутри ротонду венчает купол с круглым отверстием (*окулусом* – глазом, в переводе с латыни), сквозь которое внутрь проникает почти что неземной луч света. Это красивое пропорциональное здание с особенной атмосферой. Меня поражают его масштабы, когда я прогуливаюсь по залу и врезаюсь в людей, потому что не могу оторвать взгляда от великолепного потолка. Даже на сегодняшний день это самый большой неармированный бетонный купол в мире. Римляне достигли величайшего мастерства и создали шедевр инженерии из революционного материала, который назвали *opus caementicium*.

Огромный бетонный купол и окулус Пантеона в Риме, Италия

Особенно мне нравится в бетоне то, что его форма не определена: он может стать чем угодно. Сначала он представляет собой камень, затем превращается в комковатую серую жидкость, которую можно залить в любую форму, а потом химия делает свое дело и превращает его обратно в камень. Конечный продукт может быть круглой колонной, прямоугольной балкой, трапециевидным основанием, тонкой изогнутой крышей или гигантским куполом. Удивительная гибкость позволяет ему принимать любую форму. Благодаря высокой прочности и износостойкости бетон является вторым после воды самым используемым материалом на планете.

Если раздробить в порошок камень почти любого вида и добавить воды, то получится неинтересная жижа, в которой частички не держатся вместе. Но если так сделать с определенными видами камня и нагреть их до высокой температуры, происходит нечто странное. Если взять, например, смесь известняка и глины и запечь ее при температуре 1450°C, то они образуют маленькие комочки и не расплавятся. Если потом эти комочки измельчить в порошок, то получится первый ингредиент невероятного материала.

Этот порошок называется цементом. Он скучного серого цвета и на первый взгляд не очень впечатляет. Из-за воздействия высокой температуры изначальные материалы изменили свои свойства. Если добавить в этот порошок воды, то жижа уже не получится – вместо этого начнется так называемый процесс *гидратации.* Вода вступает в реакцию с кальцием и молекулами

силиката в извести и глине и создает волокна с кристаллической структурой. Из-за них материал похож на желе, и связи в нем гибкие, но устойчивые. Реакция продолжается, а волокна растут и соединяются друг с другом. Смесь становится все плотнее и плотнее и в конце концов затвердевает.

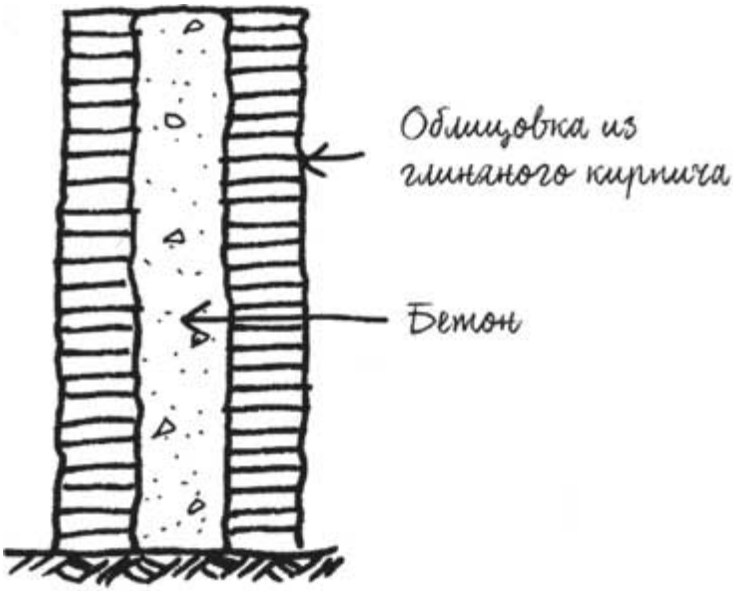
Так что вода + цементный порошок = цементная паста. Цементная паста, высыхая, превращается в камень, но и у нее есть недостатки. Прежде всего ее дорого производить. К тому же процесс требует больших затрат энергии. Важно и то, что при гидратации выделяется большое количество тепла. Когда химический процесс заканчивается, цемент остывает, а при охлаждении он сжимается. И трескается.

К счастью, инженеры поняли, что цементная паста хорошо прилипает к другим камням, и стали добавлять в смесь *заполнители* (мелкие неровные камешки и песчинки разного размера). Заполнители помогают сократить количество используемого цементного порошка (а также количество выделяемого тепла) и потребление энергии, а значит, и стоимость производства. В цементной пасте проходит та же самая химическая реакция, и образуются волокна, которые прочно приклеиваются к другим волокнам *и* заполнителям – и вся смесь затвердевает, образуя бетон, каким мы знаем его сегодня. Так вот, вода + цементный порошок + заполнитель = бетон.

Чтобы получился хороший бетон, нужно правильно рассчитать пропорции смеси: если воды будет слишком много, то не вся вода вступит в реакцию с цементным порошком, и бетон получится слабым. Если воды слишком мало, то среагирует не весь порошок, и бетон тоже получится слабым. Для наилучшего результата важно, чтобы *вся* вода вступила в реакцию со *всем* цементным порошком. Сам процесс замешивания тоже играет роль: бетон получится плохо, если его неправильно замешать. Более крупные и тяжелые камешки из заполнителя пойдут ко дну, а мелкий песок и цементная паста всплывут, и бетон получится неплотным и слабым. Вот почему у бетономешалок огромные вращающиеся барабаны: смесь в них постоянно перемешивается, и заполнители распределяются в ней равномерно.

У инженеров античности таких бетономешалок не было, зато их рецепт бетона был очень похож на наш. Они тоже обжигали известь, крошили ее, добавляли воду и получали пасту, которой можно соединять камни, кирпичи и разбитые черепицы. Однако их смесь была более комковатой и плотной, чем наша современная. Но потом римляне нашли кое-что получше. На земле вокруг Везувия было много вулканического туфа, который они называли *«поццолана».* Вместо обожженной извести они стали

использовать готовый туф. Когда они смешали его с известью, щебнем и водой, в результате получился твердый бетон. Эта смесь затвердевала даже под водой. Все потому, что для химической реакции *поццоланы* не требуется углекислый газ из воздуха и смесь схватывается и без него.

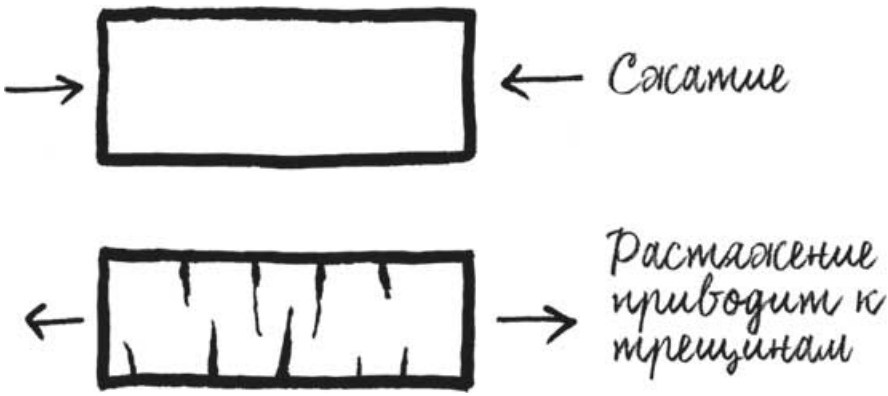



Римский бетонный бутерброд. В римских сооружениях бетонную стену с двух сторон обкладывали слоем кирпича

Римляне не сразу оценили огромный потенциал материала, который у них получился, и использовали его только в небольших постройках, и то там, где его не видно. Его использовали для укрепления стен домов и памятников, скрепляя слоем бетона ряды кирпича. В конце концов, откуда им знать, что он не растрескается и не раскрошится через несколько лет, как гипс? Годы шли, и они, конечно же, осознали, что это невероятно стойкое вещество не идет ни в какое сравнение с гипсом, и тогда бетон стали широко использовать. Так как он затвердевал и под водой, из него можно было строить основания мостов прямо в реках, и это решило проблему пересечения широких рек.

Римляне часто украшали свои сооружения арками, а бетон очень хорош для арок. Прежде всего он невероятно прочный. Если стандартный кирпич из красной глины может выдержать вес пяти слонов, то бетонный блок того же размера может выдержать вес 15 слонов. На самом деле, бетонный блок из более прочной смеси выдержит даже 80 слонов. Его прочность можно изменить в зависимости от точных пропорций ингредиентов, которые добавляют в смесь. В отличие от кирпича и раствора – где раствор

обычно слабее кирпича и более подвержен разрушению – бетон монолитен (из него делают большие непрерывные блоки), и в нем нет таких слабых соединений: его прочность во всем блоке равномерна. В конечном итоге, если сила сжатия достаточно большая, бетон треснет и раскрошится, но для этого нужна действительно большая нагрузка (или очень, очень много слонов).

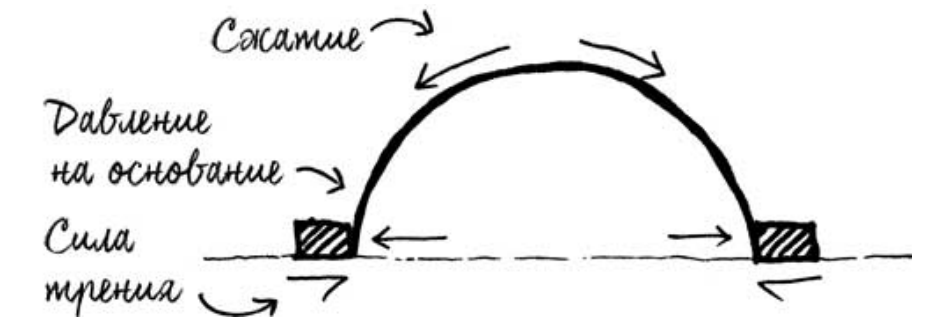



Привередливый бетон предпочитает силу сжатия. При относительно маленькой силе растяжения он начинает трескаться

Однако бетон – достаточно привередливый материал. Он любит сжатие, и несколько тысячелетий его именно так и использовали, вжимая в фундаменты и стены. Но он совсем не любит растяжения. Его устойчивость к силе растяжения минимальна. Он треснет, если применить к нему силу растяжения величиной менее одной десятой от той силы, которую он выдерживает при сжатии. Это еще одна причина, почему меня так впечатляет Пантеон. Римляне хорошо понимали свойства бетона и устройство куполов, и, даже несмотря на то что бетон – не лучший материал для строительства такого массивного сооружения, они все равно выбрали его, и при этом знали, что делали.

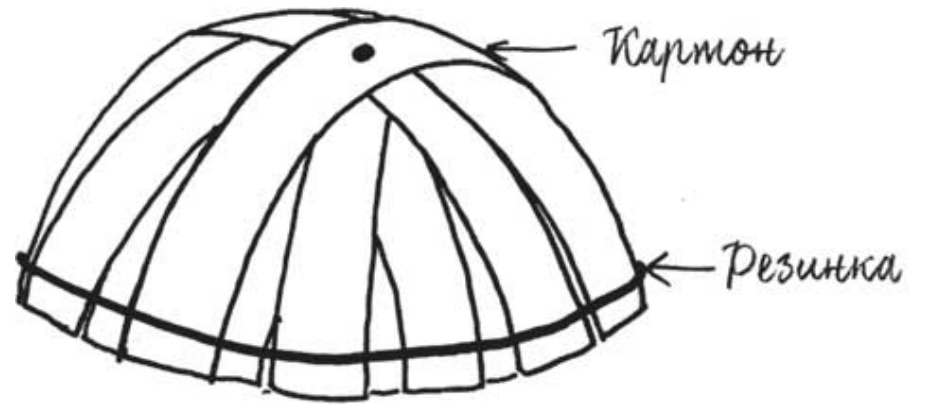
Чтобы понять, почему очень сложно выполнить купол из бетона, начнем с арки. Если согнуть длинную полоску картона в виде арки и поставить ее на стол, то окажется, что сама она не будет сохранять такой изгиб. Она просто падает. Чтобы картонная арка стояла на месте, положим на стол по ластику у ее концов снаружи. Края первой картонной арки, которая не могла устоять на столе, стремились наружу и разрушали всю постройку. На этот раз они по-прежнему стремятся наружу, но сила трения между ластиком и столом сдерживает это давление. Это иллюстрирует третий закон Ньютона: тела действуют друг на друга с силами,

равными по модулю и противоположными по направлению. Нижние концы картонной арки толкают свои подставки с определенной силой, а подставки (ластики) уравновешивают их силой, противоположной по направлению.



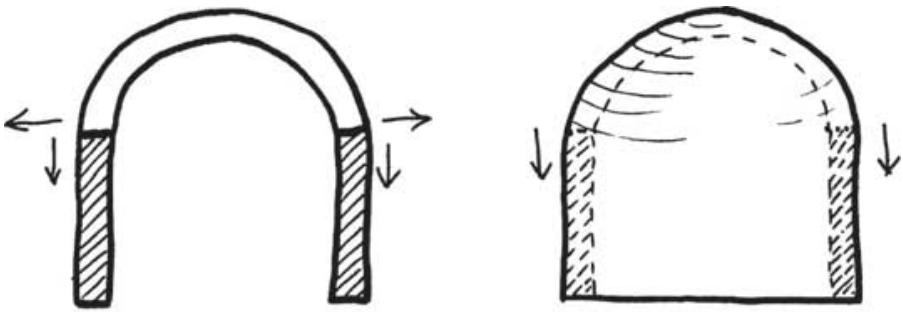

Силы распределяются в арке и воздействуют на основание

Купола устроены почти так же, как и арки, только в трех измерениях. Третье измерение как раз и усложняет дело. Если вместо одной картонной полоски взять несколько, затем сложить вместе и соединить посередине булавкой, из них по-прежнему можно создать арку. А еще можно распределить их по кругу (как меридианы у Земли) и таким образом создать полусферу, или купол. Только этот купол уже не будет самостоятельно сохранять свою форму, как это было с аркой. Чтобы он стоял на месте, можно окружить его основания ластиками, по одному у каждого конца картонной полоски. Или можно попробовать более умный способ: например, взять резинки и связать ими купол, чтобы они располагались как параллели Земли. Если так сделать, то ластики можно убрать, и купол все равно останется на месте.



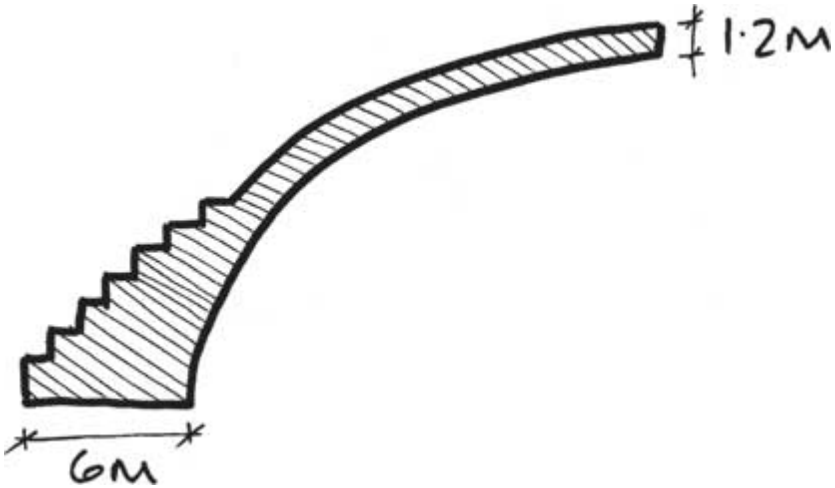

Если купол соединен правильно, то силы, распределяющиеся в нем, уже не давят на основание

А это значит, что на подставки купола уже не действуют силы горизонтального направления (в отличие от арки). Зато можно заметить, что резинки пришли в растяжение: они растягиваются и сопротивляются давлению картонных полосок. Так что да, каждая из полосок по отдельности испытывает силу сжатия вдоль меридиана, но для того, чтобы удержать их вместе, требуется сила сжатия, с которой действуют резинки – параллели.




Разница между распределением сил в арке и в куполе

Если смотреть с площади, то Пантеон кажется мелким, но на самом деле внутри он имеет почти полусферическую форму. Он кажется мелким снаружи потому, что основание гораздо толще верхушки: бетон наверху купола имеет толщину всего 1,2 м, а к основанию его толщина достигает более 6 м. Толщина у основания шире для того, чтобы купол выдерживал высокую силу растяжения – чем больше материала, тем большую силу он выдерживает.




Расширяющиеся ступеньками кольца у основания усиливают купол Пантеона

Римляне пошли еще дальше и добавили куполу стабильности с помощью семи ступенчатых колец (которые видно снаружи, чуть ниже окулуса, с высоты птичьего полета). Эти кольца выполняют ту же функцию, что и резинки в нашем эксперименте, и противодействуют силам растяжения, таким образом уравновешивая купол. Такое оригинальное решение обеспечило успех всего проекта, и, несмотря на то что бетон плохо выдерживает растяжение, римлянам удалось его приструнить.

Более толстый слой бетона, возможно, и решает проблему сопротивления силе растяжения, зато он создает новые проблемы. Чем толще купол, тем больше в нем цемента, тем больше тепла он создает и тем больше он сжимается при охлаждении. Когда он сжимается, то начинает разрушаться, и, так как бетон не может противостоять этому растяжению, он дает трещины. Римляне беспокоились, что основание купола Пантеона будет все больше и больше трескаться. Считается, что ряды квадратных выемок внутри купола, создающие его неповторимую визуальную эстетику, сделаны для того, чтобы бетон быстрее и равномернее остывал, и за счет этого меньше трескался. Несмотря на это решение, при изучении Пантеона инженеры все-таки обнаружили трещины в основании купола (они появились еще в древности, когда здание только строилось), но они не нарушили целостность античной постройки.

Впервые я побывала в Пантеоне, когда еще была подростком, и я сразу влюбилась в это здание за его красоту и ощущение умиротворенности. Во второй раз я посетила его уже дипломированным инженером и смотрела – с не меньшим восхищением – на выемки в куполе, пытаясь найти трещины в

основании. Я долго разглядывала луч света, проходящий через окулус на вершине этого необыкновенного сооружения. Меня по-прежнему поражали масштабы купола и видимая простота форм, но теперь я понимала, насколько, должно быть, сложно было построить его так много лет назад.

Я часто задумываюсь о том, будут ли, подобно Пантеону, те здания, которые мы проектируем и строим сейчас, по-прежнему существовать и сохранятся ли так же хорошо две тысячи лет спустя. Это кажется непостижимым.

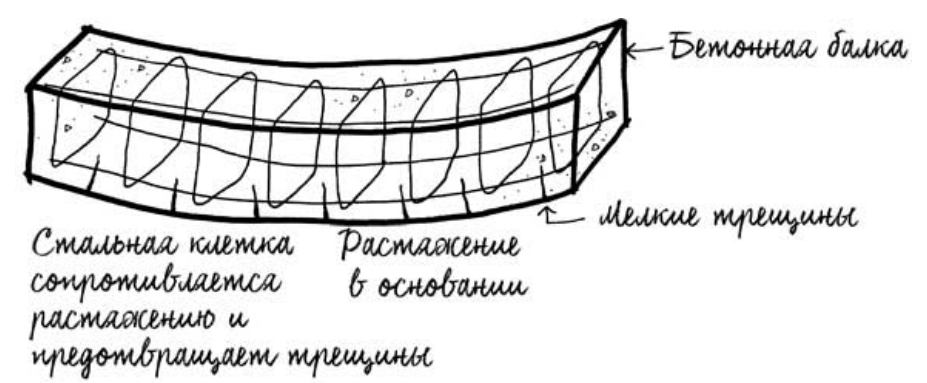
После падения Римской империи в V веке началась темная эпоха Средневековья – или, как я ее называю, эпоха трещин и крошек, – и римский рецепт бетона оказался утерян почти на тысячу лет. Мы вернулись к более примитивному образу жизни, и бетон снова появился только в XIV веке. Даже тогда инженеры продолжали бороться с основным недостатком бетона – трещинами при воздействии силы растяжения. Лишь несколько столетий спустя откроют настоящую магию бетона, и обнаружит ее самый неожиданный герой в самом неожиданном месте.

В 1860-е годы французский садовод Жозеф Монье устал от того, что глиняные горшки постоянно трескаются. Тогда он попробовал сделать горшки из бетона, но понял, что они точно так же трескаются. Совершенно случайно он решил усилить бетон, поместив в него металлическую сетку. Этот эксперимент мог оказаться неудачным по двум основным причинам: во-первых, бетон мог не сцепиться с металлом (не было причин предполагать, что он это сделает) и металл только ослабил бы горшок. Во-вторых, из-за сезонных изменений металл и бетон расширяются и сжимаются в разной степени, что должно создавать еще больше трещин. Но Монье случайно создал революционный горшок, который сохранял прочность и почти не трескался.

Как и большинство металлов, железо и сталь (как мы уже увидели) гибки и пластичны и хорошо выдерживают силу растяжения: при растяжении они не трескаются. Металлы не такие ломкие, как кирпич или бетон. Таким образом, соединив бетон (который при растяжении трескается) с железом (которое выдерживает растяжение), Монье создал идеальное сочетание материалов. На самом деле, древний вариант того же принципа можно обнаружить в Марокко, где стены некоторых берберских городов строили из глины с добавлением соломы: эта смесь называется *саман,* и ее также использовали, в числе прочих, древние египтяне, вавилоняне и коренные американцы. Солома выполняет ту же функцию, что и металл в бетоне: она связывает глину со штукатуркой и предотвращает чрезмерное образование

трещин, так как солома сопротивляется силе растяжения. В штукатурке на стенах моей викторианской квартиры содержится конский волос, служащий той же цели.

Монье представил свой новый материал на Парижской выставке в 1867 году, а затем стал применять его в создании труб и балок. Инженер-строитель Густав Адольф Вайс из Германии увидел этот материал и стал думать о том, как строить из него целые здания. В 1879 году он купил у Монье патент и начал проводить эксперименты с использованием бетона в качестве строительного материала, а затем стал пионером в строительстве бетонных зданий и мостов по всей Европе.




Идеальный союз строительных материалов: стальная решетка усиливает бетон, противостоит растяжению и предотвращает трещины

Удачный союз стали (которая заменила железо после распространения бессемеровского процесса) и бетона кажется сейчас настолько очевидным, что уже трудно себе представить, как они не встретились раньше. В каждой бетонной постройке, которую я проектирую, я использую стальную *арматуру* – длинные фактурные прутья диаметром от 8 до 40 мм, которым придают нужную форму и которые соединяют вместе, чтобы получилась решетка или сетка, составляющая основу бетонного блока. Мои расчеты показывают, где на бетон будет действовать сила растяжения, а где сила сжатия, и в соответствии с этим я распределяю стальные прутья.

Подрядчики берут мои чертежи, устанавливают размеры и форму каждого стального прута в проекте и рассчитывают его вес. Эти расчеты отправляются на завод, и через несколько недель оттуда привозят стальные прутья, которым придают нужную форму перед тем, как залить их бетоном.

Когда в бетонной смеси происходит химическая реакция, сталь и бетон образуют прочные связи. Цементная паста так же

прочно прилипает к стали, как к заполнителям. Как только они схватились, их уже трудно разъединить. У них почти одинаковые термические коэффициенты, а это означает, что они расширяются и сжимаются примерно на одну и ту же величину при одинаковых изменениях температуры. Когда бетонная балка сгибается под воздействием гравитации, сверху на нее действует сила сжатия, а внизу – сила растяжения, то снизу бетон трескается. Эти трещины – шириной в 1 мм, и часто их даже не видно, но они есть. Как только это происходит, стальные прутья в нижней части балки приходят в движение и начинают сопротивляться силе растяжения, сохраняя целостность балки.

Сегодня стальная арматура уже вошла в ДНК бетонного строительства. На многих стройплощадках в Лондоне есть небольшие окошки в заборах. Как вы легко можете себе представить, когда я прохожу мимо такого окошка, то не могу в него не заглянуть, потому что мне всегда любопытно, что там внутри. Не важно, что это за стройка, – я всегда вижу груды арматуры или стальных решеток в деревянных опалубках. Когда приезжают бетономешалки с вращающимися барабанами, они заливают в опалубки мощный бетонный водопад, а потом рабочие берут перфораторы с миксером и замешивают его так, чтобы заполнитель хорошо распределился по всей массе. Инженеры вроде меня должны удостовериться, что зазора между прутьями арматуры достаточно, чтобы между ними легко затекал бетон. Когда я только пришла на работу, мой первый начальник Джон сказал мне: «Если из твоей стальной клетки может вылететь канарейка, значит, прутья слишком далеко друг от друга. Если канарейка задыхается, значит, они слишком близко». Этот урок я не забуду никогда (в нашем мысленном эксперименте не пострадала ни одна канарейка).

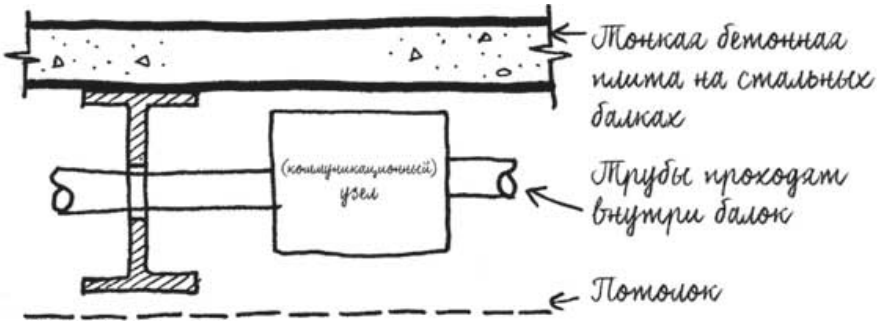
Как только весь бетон хорошенько перемешали и залили в опалубки, рабочие разравнивают его сверху большими граблями и оставляют застывать. Но у этого невероятного материала в запасе еще один секрет. За следующие несколько недель основная масса бетона пройдет химическую реакцию и затвердеет, и над ней проведут тесты, а результаты покажут, что масса достигла целевой прочности. На самом деле, эта прочность продолжит увеличиваться – очень медленно – и в следующие месяцы и даже годы, и еще долго будет стремиться к стабильному показателю.

Сегодня мы используем бетон для множества целей, строим из него небоскребы, многоквартирные жилые дома, туннели, шахты, дороги, плотины и многое другое. В древние времена разные цивилизации использовали различные материалы и технологии в соответствии со своими навыками, климатом и

окружающей средой. Сегодня во всем мире используется бетон.

Ученые и инженеры постоянно вводят какие-нибудь новшества и пытаются создать еще более прочный и долговечный бетон, чем у нас есть сейчас. Одним из недавних изобретений стал «самовосстанавливающийся» бетон, в котором содержатся крошечные капсулы лактата кальция. Их примешивают к жидкому бетону, и у них есть свой любопытный секрет. Внутри капсул находится особый тип бактерий (в природе он встречается в озерах вблизи вулканов с высоким содержанием щелочи), которые могут жить без кислорода и пищи по 50 лет. Бетон перемешивают с этими капсулами, и он затвердевает. Если в материале образуются трещины и в них попадает вода, то вода активирует капсулы и освобождает бактерии. Так как беглецы привыкли жить в щелочной среде, они не умирают, когда попадают в бетон, где также высокое содержание щелочи. Вместо этого они питаются размоченными капсулами, и таким образом из кальция в сочетании с кислородом и углекислым газом они производят кальцит, то есть чистую известь. Кальцит заполняет трещины в бетоне, и постройка самовосстанавливается.

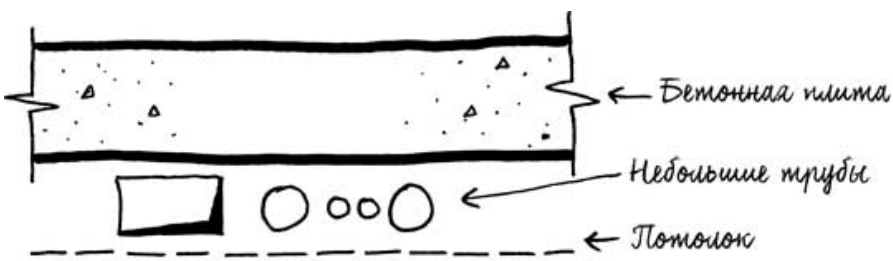
Но есть и другие проблемы. Пять процентов углекислого газа, производимого человеческой цивилизацией, приходится на производство бетона. Сам бетон в небольших количествах не особо вредит окружающей среде, но мы используем его в таких огромных количествах, что выбросов становится все больше и больше. Некоторая часть углекислого газа образуется при обжиге извести, а остальной выделяется при реакции гидратации. Количество цемента в смеси можно сократить, если заменить какую-то его часть подходящими материалами из отходов промышленного производства – например, «молотым гранулированным доменным шлаком», который образуется при производстве стали. Использование этих отходов не влияет на прочность бетона, зато экономит тонны углерода. Их можно применять не во всех видах строительства, потому что ингредиенты меняют состав и свойства смеси. Из-за них бетон может дольше застывать или стать более липким, а значит, из него труднее будет построить многоэтажное здание, не говоря уже о небоскребе.




Расположение стальных балок и бетонных полов в офисном здании

«Мой» небоскреб – «Осколок» – построен из бетона и стали очень хитрым способом и удовлетворяет всем требованиям как офисных, так и жилых помещений. Обычно в офисных зданиях мы стремимся создавать в основном большие пространства с как можно меньшим числом колонн. Выбор часто падает на сталь, потому что она хорошо себя ведет как при сжатии, так и при растяжении, а это значит, что стальные балки могут быть гораздо длиннее при той же глубине. Кроме того, по сравнению с жилыми домами, офисам нужно больше кондиционеров, воздуховодов, водопроводных труб и проводов. I-образная форма стальных балок и частые зазоры между соседними балками позволяют многое из этого спрятать от глаз. Стальные конструкции легче, чем аналогичные бетонные, поэтому и фундамент им требуется поменьше.

С другой стороны, в жилых домах и отелях этажи делятся на квартиры и номера, так что открытые пространства не так уж нужны. В стенах можно прятать бетонные колонны, которые поддерживают бетонные плиты. Бетонные перекрытия тоньше стальных, так что в бетонном здании поместится больше этажей при той же высоте. В этих зданиях меньше проводов и труб, и их можно крепить к перекрытиям снизу. Кроме того, бетон лучше поглощает звук, так что между этажами меньше слышимость – в офисах, где вы, надеюсь, не ночуете, это не так важно.




Устройство бетонных полов в жилом здании

Так как в «Осколке» на нижних этажах располагаются офисы, а на верхних – отель и квартиры, в разных местах мы использовали различные материалы. Нижние этажи состоят из стальных колонн и балок, благодаря чему в офисах удалось создать большие открытые пространства. Верхние этажи построены из бетона для меньшей слышимости и большего комфорта. Выбор нужного материала для каждой цели кажется очевидным, но на самом деле такое решение довольно необычно, и реализовано оно всего в нескольких зданиях во всем мире. Одна из возможных причин в том, что использовать во всем здании один и тот же материал легче с логистической точки зрения (и, возможно, дешевле), но я бы возразила, что в долгосрочной перспективе мы только выигрываем и к тому же используем меньше материала. Еще одной причиной может быть то, что таких многофункциональных зданий вообще не так уж и много, как зданий только с одной функцией. Но, так как многофункциональных зданий становится все больше и больше, я ожидаю, что метод проектирования с использованием различных материалов для разных помещений будет востребован.

Эффективное использование имеющихся материалов – это и есть хорошая инженерия. Бетон часто представляется нам старомодным из-за своего древнего происхождения, но он по-прежнему является неотъемлемой частью будущего. Ученые и инженеры разрабатывают новые сверхпрочные смеси и пытаются сделать бетон более экологичным. Возможно, когда-нибудь мы придумаем новый материал, который полностью вытеснит бетон. А пока города растут с бешеной скоростью, пытаясь удовлетворить требованиям мирового роста населения. Так что бетонные здания еще долго будут украшать наш горизонт. А это значит, я еще долго буду ходить и гладить бетон.

# Глава 7. Небо

За годы работы у меня было много разных проектов, от пешеходного моста в Ньюкасле и бетонных жилых домов в Лондоне до реставрации кирпичного здания вокзала Кристал Пэлас. Но именно небоскребы стали своего рода моей специализацией – что забавно, потому что сама я боюсь высоты.

Не поймите меня неправильно: меня не сковывает жуткий страх, и я не выпучиваю глаза, как Джеймс Стюарт в начале фильма *«Головокружение»*. Я не исхожу соплями, когда смотрю вниз с большой высоты, даже если у меня подкашиваются колени. Но это, несомненно, иногда приводит к неловким моментам на работе. Обычно на работе я сижу в безопасности за своим письменным столом в офисе (на спокойной высоте девятого этажа). Но иногда мне приходится надеть классический для моей профессии наряд: строительную каску, светоотражающий жилет, сапоги со стальными мысами, – и залезть на здание, которое я проектирую.

Так что со смешанным чувством волнения и тревоги в мае 2012 года я вышла на станции Лондон-Бридж, повернула направо и пошла по улице по направлению к ярко-синей фанерной двери в заборе, окружающем стройку, мимо которой тысячи людей каждый день проходят по дороге на работу, не обращая на нее никакого внимания. Раньше эта дверь служила входом в «Осколок» и была совсем не похожа на блестящий парадный вход из стекла и стали, который встречает посетителей сегодня.

Пройдя сквозь фанерный портал, я попала в лабиринт из пластиковых ограждений, которые провели меня к зданию, и немного волновалась, что я заблужусь, потому что лабиринт был устроен уже не так, как в прошлый раз, когда я там была. Наконец я неуверенно ступила на подъемник, напоминающий клетку, который был слегка наклонен в ту же сторону, что и стена башни. Он задрожал и заскрипел, а потом рванул наверх, а я приклеила взгляд к стене и не осмеливалась смотреть вниз. (Было классно осознавать, что лифт в «Осколке» стал первым наклонным подъемником в башне, но комфортнее мне от этого не становилось.) Когда лифт наконец остановился, я оказалась примерно посередине высоты здания. Там было тихо и безлюдно, и каркас пока был на виду: стальные колонны ржавого цвета возвышались над крепким пятнисто-серым бетонным полом. Борясь с искушением его погладить, я постаралась представить, как будет выглядеть это место, когда в нем будет много людей, мебели и всяких событий. Но тогда там было совершенно тихо.

Сейчас «Осколок» – достопримечательность Лондона

Я заставила себя снова войти в подъемник и поднялась уже на самый высокий уровень, до которого он мог довезти, – на 69-й этаж. Здесь было совсем по-другому. Конструкция еще была открыта всем ветрам. По краям стояли металлические ограждения, потому что стекла еще не установили. Уединенность нижних этажей сменила суета стройки: кричали рабочие, звенела

сталь, краны сигналили, опуская балки, а из тарахтящих насосов выливался бетон. Надо мной возвышалась корона башни – ее элегантный шпиль, который я разработала. Еще восемнадцать лестничных пролетов вели на последний этаж. Вдруг меня осенило, что я впервые могу туда подняться, потому что в прошлый раз, когда я здесь была, этих этажей еще не было. Сегодня – особенный день.

На последней ступеньке мне пришлось остановиться. Из-за сужающейся формы башни последний этаж – 87-й – относительно маленький. Даже на лестнице, которая проходит в середине этажа, мне показалось, что я нахожусь очень близко к краю. Мне скрутило желудок. Я сдерживала растущее чувство страха. Свежий прохладный воздух заполнил легкие, когда я сделала несколько успокоительных вдохов с закрытыми глазами. Когда головокружение уменьшилось, я открыла глаз (да-да, только один).

Я стояла между небом и человечеством. Спустя многие месяцы построения моделей, расчетов и чертежей я наконец увидела воочию свой проект. Он оказался гораздо больше и более осязаемым, чем чертежи на листе бумаги или на экране монитора. Это самый захватывающий этап строительства: момент, когда у здания еще нет всех этих деталей вроде натяжных потолков и дверей, его не ограничивает фасад, а за порог еще не ступала нога посетителя. Мои чувства сравнимы с тем, что ощущаешь, когда тебя пускают за кулисы на репетицию большого рок-концерта и у тебя есть привилегия подсмотреть за всем тем, что спрячется от глаз зрителей и приукрасится, но при этом составит основу всего шоу. Посещение стройки наполнило меня благоговением перед объектом, который мы создали. Он подарил мне новую порцию вдохновения и сил и напомнил, за что я так люблю творческий процесс проектирования и строительства, особенно небоскребов.

Если нарисовать график строительства высочайших зданий в мире за все время, а это занятие – как раз одно из тех, за которыми я с удовольствием скоротаю вечер, – то можно увидеть, что график устремляется в небо около 1880-х годов. Несколько тысячелетий Великая пирамида Гизы (высотой 146 метров) удерживала рекорд самого высокого сооружения, построенного человеком. Рекорд был побит только в Средневековье Линкольнским собором (160 м), гордо носившим этот титул с 1311 по 1549 год, пока во время грозы ему не сорвало шпиль. Тогда первенство выхватила церковь Святой Марии в Штральзунде в Германии (151 м), пока сама не лишилась шпиля при ударе молнии в 1647 году. На первое место вырвался

Страсбургский собор (высотой всего 142 метра, но к тому времени Великая пирамида настолько пострадала от эрозии, что уже не достигала 140 метров). Настоящая борьба за высоту началась в XIX веке, когда в Чикаго в 1884 году построили первый небоскреб. По правде говоря, 10 этажей – всего 42 метра – сегодня уже никого не впечатлят, да и вряд ли кто-то назовет такое здание небоскребом, но это было высокое сооружение с металлическим каркасом. В 1889 году Эйфелева башня первой преодолела отметку в 300 метров. С тех пор выросли и наши амбиции, и наши здания. Около четырех тысяч лет ушло на то, чтобы побить рекорд пирамид, не считая историй с сорванными шпилями. Зато за последние 150 лет наши здания выросли со 150 метров до более 1000 метров.

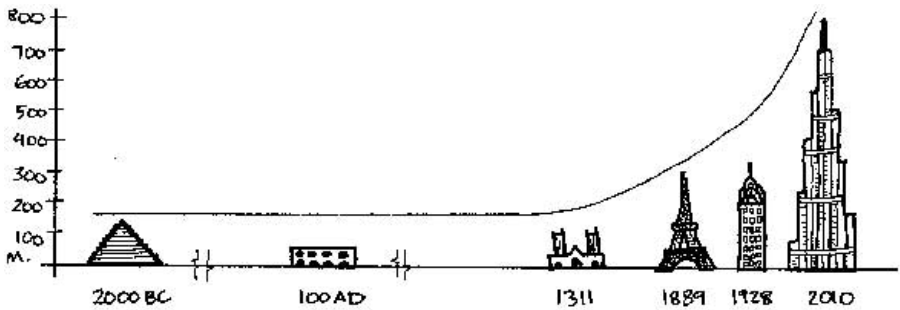
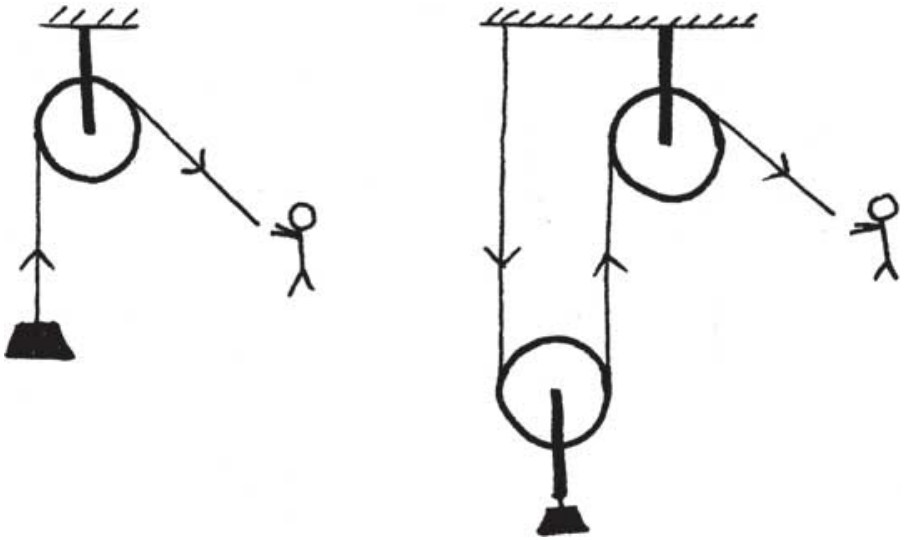



График роста высоты зданий относительно времени наглядно показывает, как технические инновации последнего столетия ускорили рост высоких конструкций

Исаак Ньютон как-то сказал: «Я видел дальше других лишь потому, что стоял на плечах гигантов». Стоя на вершине высочайшей башни в Западной Европе (310 м) и понимая, какие материалы и технологии понадобились для ее сооружения, – под звон стали и сигналы подъемного крана я вспомнила о том, как мы к этому пришли и какие исторические личности помогли нам подняться в небо. Ньютон, конечно, был одним из этих людей: без его третьего закона движения, например, я не могла бы рассчитать силы, воздействующие на арку. Но есть и другие люди, заставившие нас раздвигать границы своих фантазий (и мыслить за пределами своих простых одноэтажных жилищ) и создавшие подъемные краны и лифты, без которых мы бы до сих пор продвинулись не намного дальше своего первого этажа. «Осколок» построен не просто на инновационном фундаменте – он возведен на богатом наследии исторической мысли и прогрессивных шагов, которые произвели революцию в строительстве и сделали возможным появление небоскребов. Для

начала, чтобы поднять над землей высокое здание, нам нужно научиться поднимать над землей простые предметы. До изобретения подъемного крана сложность этой задачи серьезно ограничивала наши строительные амбиции – пока Архимед (287–212 гг. до н. э.) не изобрел систему блоков.



Простая (слева) и сложная (справа) системы блоков

Сами блоки существовали еще до Архимеда. Примерно в 1500 году до н. э. в древней Месопотамии (на территории современного Ирака) использовали систему с одним блоком для поднятия воды из-под земли. Блок – это подвешенное колесо, вокруг которого обернута веревка. Один конец веревки привязывают к тяжелому объекту, который нужно поднять – например, к ведру, – а за другой конец тянет человек. Это был очень практичный инструмент, так как благодаря ему предметы можно было поднимать вверх, потянув веревку вниз и стоя при этом на земле, с использованием силы тяжести. До изобретения блока приходилось находить уровень выше места назначения тяжелого предмета и толкать его наверх. Блок изменил направление силы, а это значит, что мы научились поднимать более тяжелые грузы.

Архимед обладал неуемным воображением, которое применял к своим познаниям в математике, физике и даже создании оружия, а также в инженерии. Он улучшил блок, обернув веревку вокруг нескольких колес вместо одного. Если в системе всего один блок, то сила, которую нужно применить для поднятия груза с определенным весом, равняется этому весу. Поэтому для поднятия предмета массой 10 кг требуется сила

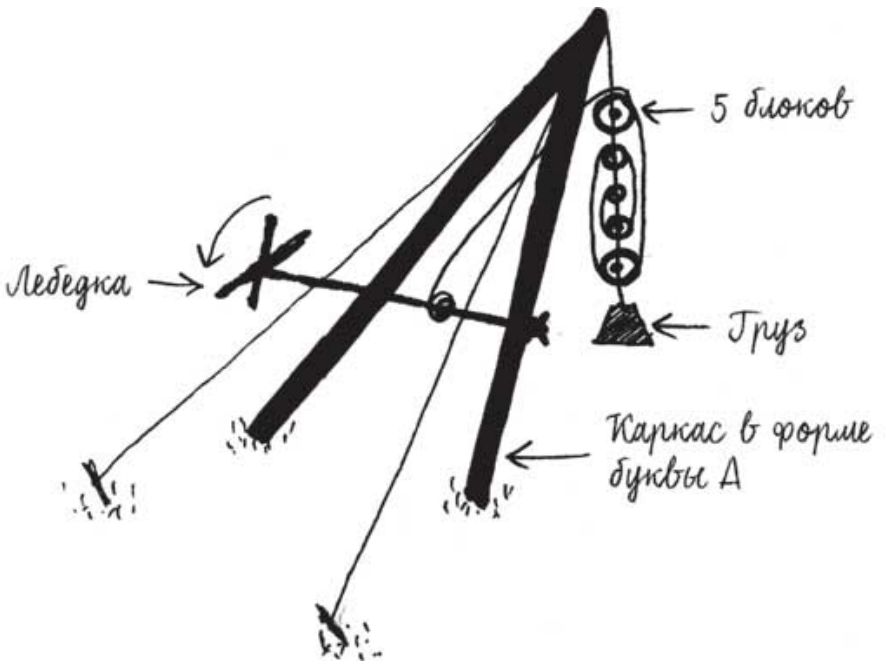
10 кг × 9,8 м/с$^2$ (ускорение свободного падения) = 9,8 Н. (Н – *ньютоны:* единица измерения силы, названная в честь ученого, и еще одно напоминание о том, какую важную роль он сыграл для инженерии – без его закона всемирного тяготения я бы не смогла выполнить эти вычисления.) Количество *энергии,* которую мы израсходуем, равно силе, умноженной на расстояние. Если у нас всего один блок и мы хотим поднять этот груз на высоту 1 м, то веревку тоже нужно будет тянуть 1 м, так что затраченная энергия будет равна 9,8 Н × 1 м = 9,8 Н·м (ньютон-метров).

Но если использовать два блока, то энергия останется прежней (потому что мы перемещаем тот же вес на то же расстояние), а приложенная сила уже в два раза меньше. Это происходит потому, что вес теперь поддерживает не один, а два участка веревки. Каждый участок веревки нужно сдвинуть на 1 м, чтобы переместить груз на 1 м, значит, всю веревку нужно сдвинуть на 2 м. Поскольку энергия остается прежней, а расстояние в два раза больше, то сила, которую нужно применить, в два раза меньше. Тот же принцип распространяется и на три блока, и на десять.

Архимед смело заявил своему правителю царю Гиерону II, что может передвинуть *любой* груз с помощью своей системы блоков. Гиерон, что неудивительно, отнесся к заявлению со скептицизмом и потребовал доказательств. Одно из крупнейших грузовых судов из арсенала царя наполнили грузами и людьми. Обычно, чтобы дотащить его до моря, требовалась вся сила нескольких десятков человек, но Гиерон поставил Архимеду задачу выполнить это в одиночку. На глазах у царя и собравшейся толпы Архимед установил систему блоков, продел в них веревку, привязал один ее конец к кораблю, а за второй потянул. Если верить *«Жизнеописаниям Плутарха»* (сборник биографий, который, как считается, написан в начале II века), «он повел корабль по прямой линии, так же плавно и равномерно, как если бы тот плыл по морю».

Римляне увидели потенциал в системе из нескольких блоков и даже усовершенствовали ее, создав на ее основе подъемный кран. Два деревянных шеста в форме перевернутой буквы «V» составляли каркас крана. Верхние концы шестов соединяли железной скобой, а основание закрепляли на земле. Между двумя шестами вставляли перекладину (получалась буква «А»), которая служила лебедкой: к ней можно было привязать веревку и, проворачивая лебедку, поднимать или опускать груз, прямо как в колодце с воротом. К верхушке крана крепился механизм из двух блоков. Через нее проходила веревка, идущая от лебедки, а затем шла в третий блок, находящийся прямо над грузом. На обоих

концах лебедки располагались оси с ручками, с помощью которых ее можно было вращать, и таким образом относительно тяжелые грузы легко поднимали и опускали. Если римлянам нужно было поднять что-нибудь более крупное, они добавляли больше блоков и вращающихся секций, а ручки заменяли большим *поворотным колесом.*




Древнеримский подъемный кран с системой блоков

С помощью крана с блоками римский рабочий мог поднимать грузы в 60 раз тяжелее, чем поднимали древние египтяне. Хотя сегодняшние краны намного большего размера, они по-прежнему работают по тому же принципу. Длинные квадратные полые стальные детали соединяют так, чтобы получилась высокая башня, и к ней прикрепляют длинную балку, или *стрелу.* В стреле располагается система многочисленных блоков, а рабочих и ручки древнеримской лебедки заменяет сила бензинового двигателя. Стрела движется вправо и влево и поворачивается на 360°, перемещая тонны стали и стекла, которые надежно крепят к современной версии архимедовского изобретения.

Осознав потенциал подъемных кранов и арок, римляне смогли сооружать более крупные постройки. И их способности совпадали с амбициями: они были готовы и мыслить шире. По мере роста территории империи, а вместе с ней и населения, небольшие поселения стали вырастать в огромные города. Чтобы все поместились, они стали строить *инсулы* – древний эквивалент

многоквартирных домов, высотой аж до десяти этажей. (Пирамиды, конечно, были намного выше, только в них нельзя было жить.)

*Инсула* занимала целый городской квартал, и со всех сторон ее окружали дороги (отсюда и название, ведь *инсула* значит «остров»). Вместо внутреннего атриума, откуда в большинство частных домов того времени проникал свет и свежий воздух, у *инсулы* окна выходили на город: по сути, это был дом наизнанку. Первый этаж состоял из множества колонн, между которыми были относительно неглубокие арки. Поверх арок укладывали слой бетона, который сверху выравнивали и получали пол следующего этажа. Если бы не было арок, то для поддержки поэтажных балок требовалось бы гораздо больше колонн, и получились бы гораздо более маленькие и загроможденные помещения.

Впервые за всю историю римлянам пришлось проектировать фундамент так, чтобы их массивные сооружения не утонули в земле. Они изучали почву под проектируемым зданием, а потом закладывали соответствующий фундамент из камня и бетона.

Самые дорогие и престижные квартиры находились на первом этаже. Чем выше этаж, тем меньше и дешевле становились жилища, – сегодня, конечно, все как раз наоборот: вершиной роскоши (в буквальном смысле) стал пентхаус, который обойдется вам в целое состояние. В *инсулах* постоянно кипела жизнь: так как лифтов еще не было, жильцам приходилось все время ходить по лестнице. Поскольку воду еще не умели поднимать на верхние этажи с помощью насосов, люди таскали чистую воду наверх на себе, а грязную уносили обратно вниз (хотя многие просто выплескивали ее из окон). На лестнице даже можно было встретить животных: говорят, как-то на третий этаж такого дома забрела корова.

В *инсулах* было шумно: даже когда изобрели стеклянные окна, которые заменили ставни, шум с улицы все равно никуда не делся. Еще до рассвета вставали пекари, и было слышно лязганье печей. Потом утром учителя кричали свои уроки на площадях. Весь день были слышны постоянный стук чеканщиков золота, звон монет менял, вопли попрошаек и выкрики торгашей, которым нужно было загнать товар. Ночью к этому шуму примешивались еще танцы, пьяные матросы и скрипучие телеги. Но еще хуже шума и антисанитарии был страх, что дом может обрушиться или сгореть, что частенько происходило с постройками плохого качества. Император Август издал указ, который уже тогда регулировал планировку зданий, и ограничил максимальную высоту домов 20 метрами (а Нерон сократил ее до

18 м), но эти требования часто не соблюдались. Несмотря на все неудобства, к 300 году большинство римлян жили в *инсулах*. Таких зданий было около 45 тысяч, притом что частных домов, где жила одна семья, было меньше 2 тысяч.

Это первый случай в истории, когда стали строиться практичные многоэтажные дома, где могли жить сотни людей. Сама идея была революционной – хотя первым жильцам таких домов, вероятно, было не очень приятно существовать бок о бок с соседями, а посторонним такой непривычный образ жизни и вовсе казался странным. Но это и было будущее.

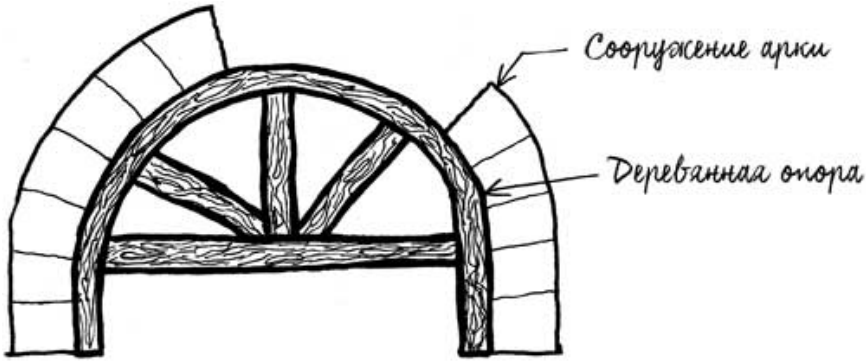
Сама идея – жилища, расположенные друг над другом, – и легла в основу того, что впоследствии превратится в небоскреб.

Архимед взял блок из месопотамской цивилизации и усовершенствовал его. Римляне, в свою очередь, переняли технологию Архимеда и стали применять ее по-новому, в процессе создав грузоподъемные краны. Но прогресс в инженерии основан не только на применении, доработке и передаче существующих традиций. Иногда приходится нарушать традиции и мечтать о невозможном. Например, я восхищаюсь Леонардо да Винчи (1452–1519), которому удалось нарисовать в воображении первые летательные аппараты, механические средства передвижения и знаменитую концепцию моста (составленную из коротких модулей в виде лестниц, которые можно быстро собирать и разбирать). Еще одним таким мыслителем был Филиппо Брунеллески (1377–1446), который в одиночку – и, как увидим, самоотверженно – создал один из самых знаменитых куполов в архитектуре Возрождения и произвел революцию в строительстве, возведя его без несущего каркаса. Неплохо для человека, которому вслед люди кричали: «Вот идет сумасшедший!»

Еще до Брунеллески работа над собором Санта-Мария дель Фьоре во Флоренции продолжалась более 100 лет. Указ от 1296 года предписывал построить здание «столько великолепное, что своей высотой и красотой оно превзойдет все подобные постройки греков и римлян», и в том же году началось строительство по проекту Арнольфо ди Камбио (которому принадлежат еще две величайшие достопримечательности Флоренции: базилика Санта-Кроче и Палаццо Веккьо). Несмотря на грандиозный указ, за последующие десятилетия постепенно стал улетучиваться и энтузиазм, и энергия граждан – не говоря уже о деньгах, – так что собор, еще и без купола, доделали только к 1418 году. Во время строительства как-то мало подумали о том, как вообще водрузить купол на огромную 42-метровую дыру.

Дуомо Брунеллески во Флоренции, или собор Санта-Мария дель Фьоре

Брунеллески вырос как раз неподалеку от строительной площадки с незаконченным собором. Строительство шло так долго, что одну из улиц рядом со стройкой так и назвали Lungo di Fondamenti, или «вдоль фундамента». В подмастерьях Брунеллески научился отливать бронзу и золото, ковать железо и придавать металлам форму. Потом он переехал в Рим, где изучал технологии своих предков, древних римлян. Брунеллески всегда интересовался инженерией и еще в молодости сформулировал два важных намерения: возродить архитектуру до величия древнеримских времен и построить собору купол. Шанс осуществить оба этих намерения представился, когда власти, отвечавшие за собор, устроили конкурс, чтобы найти подходящего кандидата для создания купола. У Брунеллески было мало шансов выиграть, так как даже более скромные его проекты из-за его радикальных идей вызывали много неприязни, а дипломатия не была его коньком. (Как-то раз комитет, который рассматривал его проект, силой выгнал его и выбросил на площадь, после чего его стали называть безумцем.)




Процесс сооружения арки с деревянной опорой позволяет положить на место несущие камни, а затем заложить замковый камень

Пожалуй, нетрудно понять, почему люди осуждали Брунеллески, заявившего, что у него есть новый метод. Тысячи лет арки – и купола – строили одинаково. Плотники собирали деревянную опору, или *кружало,* которое помещалось внутри будущего купола или арки. Каменщики аккуратно выкладывали вокруг него материал, часто соединяя кладку каким-нибудь раствором. Они начинали с закладки камня или кирпича в основание, а затем постепенно поднимались к центру арки. Заканчивался процесс закладкой *замкового камня.* До момента закладки замкового камня своды арки, поднимающиеся от основания, разъединены. Их поддерживает деревянная опора, без которой недостроенная арка просто обрушится. Как только на место кладут замковый камень, силы сжатия распределяются по всей арке, и она обретает устойчивость. Теперь опору можно убрать, и арка останется на своем месте. Купола сооружали по тому же принципу, только опора имела форму полусферы.

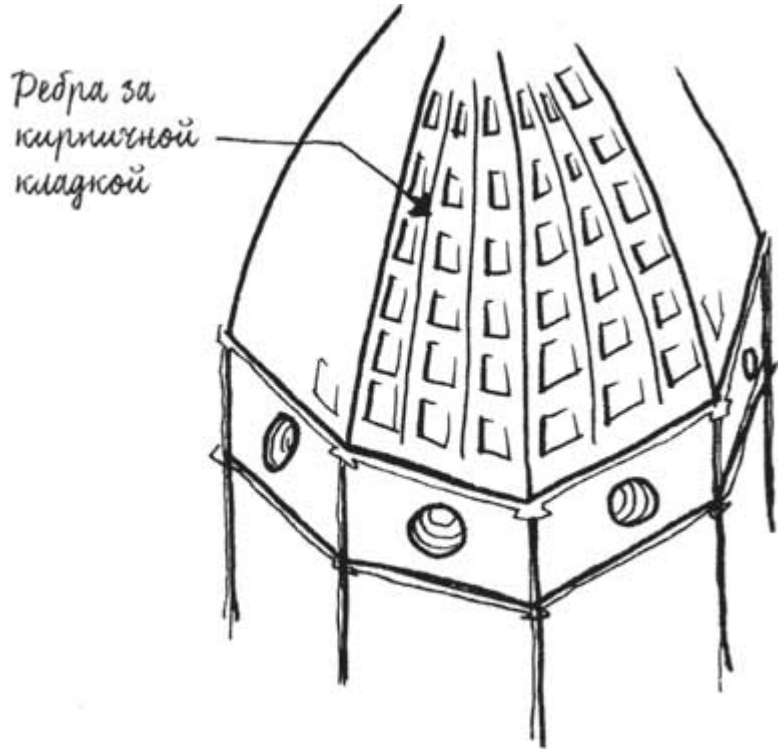
Все считали, что это единственный способ построить купол. Но Брунеллески был не согласен. Он представил комитету модель шириной 2 м и высотой почти 4 м из 5000 кирпичей, которую, по его словам, он построил за месяц *без* использования опоры. К его заявлению отнеслись скептически, тем более что он отказался рассказать, как ему это удалось.

Судьи, которым поручили выбрать проект купола, настойчиво просили архитектора раскрыть свой метод, но Брунеллески отказался. На одном из собраний с судьями, где присутствовало несколько экспертов, которые тоже представили свои проекты, он попросил принести в зал яйцо. Если кто-либо из его противников сможет поставить яйцо вертикально на кончик, заявил он, то он станет победителем. Один за другим конкурсанты предпринимали попытки сделать это, и у них ничего не вышло.

Тогда Брунеллески постучал яйцом по столу, слегка надломив скорлупу на кончике, и поставил его вертикально на стол. Остальные возразили, что так мог сделать любой, если бы знал, что можно ломать скорлупу, а он ответил: «Да, и то же самое вы сказали бы, если бы я рассказал, как собираюсь построить купол». Контракт достался ему – хотя, возможно, только потому, что других практических решений было мало. (Один человек даже предложил наполнить собор землей, чтобы поддерживать купол во время строительства. После возведения купола землю убрали бы мальчишки, чтобы достать монеты, которые в нее нарочно положили.)

Я ездила во Флоренцию, когда изучала физику. Понте-Веккьо, колокольня Джотто, баптистерий Сан-Джованни и Санта-Феличита – словно экспонаты музея на открытом воздухе, посвященного инженерии Средневековья и раннего Возрождения. *Дуомо*, как с любовью называют городской собор, – одна из доминант в архитектуре города. Я немного постояла снаружи, словно впитывая все это: аккуратную симметрию трех дверных проемов, разделенных четырьмя высокими колоннами (и еще двумя наверху), и ряд весьма замысловатых изображений Марии и апостолов под самым большим окном из розового стекла. Круги, стрельчатые арки, треугольники и прямоугольники, цветные полосы из камня – все это сложилось вместе в приятный геометрический хаос. Наконец я вошла в собор, и мой взгляд сразу же приковал свод купола, парящий высоко надо мной.

Его основание представляет собой восьмиугольник, и на каждой его грани круглый витраж, сквозь который проникает свет. Еще больше света льется внутрь через *окулус* на вершине купола. Над витражами располагаются великолепные фрески, на которых изображены картины Страшного суда: хоры ангелов, святые и олицетворения добродетелей борются за внимание в слоях окрашенного облака. Все это прекрасно, но моему внутреннему ученому хотелось узнать, как все устроено, увидеть строение купола за красивой отделкой.




Скелет Дуомо, скрытый между двумя слоями кирпичной кладки, – это инновация Брунеллески

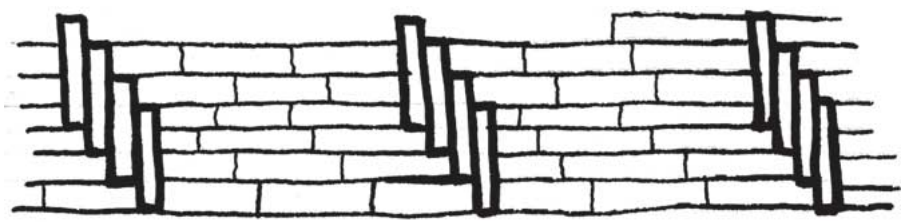
Лучший вид на купол открывается с колокольни Джотто, которая стоит на площади у западного угла собора. 414 ступенек проверили меня на прочность, и наконец я оказалась на вершине, глядя на терракотовые черепичные своды и белые ребра, придающие куполу форму. Подходящее место для того, чтобы насладиться захватывающим зрелищем и восхититься гением Брунеллески. На мой взгляд, нестандартное мышление Брунеллески в сочетании со смелым его воплощением представляют ценность для современной инженерии. Именно мышление вне общепринятых традиций и способность представлять себе «невозможное» двигают инженерию вперед.

Брунеллески изобразил ребра на характерных подробных чертежах. Ребра сложены из камня, и они выполняют функцию арок, опирающихся на восемь углов купольного отверстия. Эти арки поддерживали грани восьмиугольного купола. Между основными восемью каменными ребрами располагались еще шестнадцать для сопротивления силе ветра. Снаружи их не видно, потому что Брунеллески спрятал их в пространстве между слоями кирпичной кладки. Создав это пространство, он смог не только спрятать вспомогательные ребра, но и сократить вес

купола в два раза по сравнению с тем, сколько он весил бы, если бы был сплошным. Благодаря такой облегченной конструкции купол удалось построить без опоры.

Брунеллески вернулся к основам. Кирпичные конструкции обычно выкладывают слоями: слой кирпича, затем слой раствора, снова слой кирпича и т. д. Представьте обычную садовую стену, и принцип будет понятен. А теперь предположим, что стена должна быть наклонной (это маловероятно, конечно, но вы уж потерпите меня немного). Тогда перед нами встает проблема: так как стена наклонная, то чем она выше и тяжелее, тем больше опасность того, что она не выдержит и треснет. Раствор обычно слабее кирпича, так что, скорее всего, разлом произойдет в слое раствора.

Чтобы этого не произошло, Брунеллески попросил каменщиков сделать что-то, чего они никогда раньше не делали. Он велел им положить три кирпича по горизонтали, а затем класть кирпичи по вертикали, как книжные корешки, с каждой стороны горизонтальной группы. Следующим слоем шли три кирпича по горизонтали, а затем кирпичи по вертикали с каждой стороны. Это была очень кропотливая работа: заложить нужно было четыре миллиона кирпичей, и рабочие терпеливо ждали, когда на одном слое высохнет раствор, прежде чем приступать к следующему. Кирпичи складывались в узор «елочкой», который так называется потому, что напоминает расположение ветвей у ели. Как инженер я восхищаюсь этой идеей и ее простотой. Поскольку сплошные слои раствора могли дать слабину, Брунеллески придумал разделять их вертикальными кирпичами, благодаря чему изогнутая стена гораздо крепче.



Укладка кирпичей «елочкой», в которой вертикальные кирпичи усиливают стену

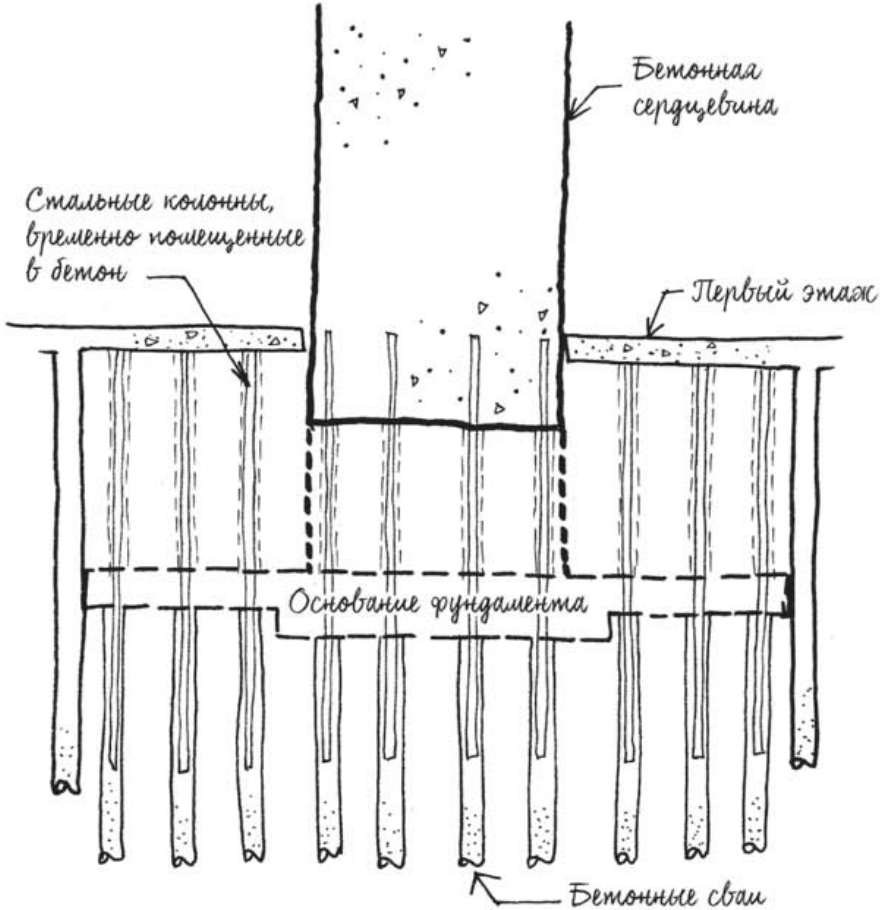
Такой же инновационный метод лег в основу проекта «Осколка». При проектировании его сердцевины команда инженеров, с которой я работала, придумала уникальный способ ее сооружения. Чтобы сэкономить время, мы решили работать сразу в двух направлениях: копать вниз и закладывать фундамент и одновременно строить вверх. Обычно для закладки фундамента

выкапывают огромную яму, а ее стены строят из бетона или стали. Сваи – длинные бетонные колонны – забивают на дно ямы. Они будут поддерживать будущее здание. Потом на каждый этаж фундамента заливают бетонные плиты, пока не дойдут до первого этажа. Только после этого можно начинать строить над землей.

Но мы сделали нечто беспрецедентное. Мы попросили установить сваи на *первом* этаже, а огромные стальные колонны погрузить в сваи. Сначала построили плиту первого этажа с гигантским отверстием. Через это отверстие рабочие получили доступ к почве, а затем землекопы убрали землю, чтобы открыть бетонные сваи со стальными колоннами внутри. Пока они продолжали копать вниз, к открывшимся стальным колоннам присоединили специальное устройство, которое позволило построить бетонную сердцевину.

Пока строилась сердцевина, достроили подвал и фундамент. В какой-то момент двадцать этажей массивной бетонной сердцевины держались на одних только стальных колоннах – фундамента еще не было. Это была постройка на ходулях.

Этот метод, который назвали строительством «сверху вниз», использовали и раньше – для поддержки колонн и перекрытий в небольших постройках. Но его еще не применяли при строительстве сердцевины, не говоря уже о сооружении такого размера. Это была инженерная инновация. Наша способность мыслить за пределами стандартных методов сэкономила время и деньги – мы творчески подошли к решению практической задачи. Сейчас и другие используют нашу идею в своих проектах – как и всегда, усовершенствование существующих методов приводит к инновациям, будь то один из самых известных кафедральных соборов в мире или одно из высочайших зданий в Европе.



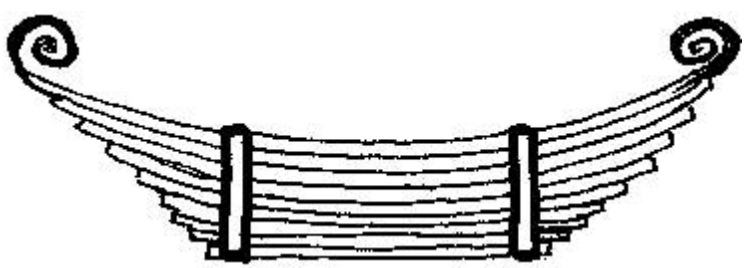

Метод строительства «сверху вниз», который использовался при возведении «Осколка» в Лондоне

Во время того посещения стройки «Осколка» в мае 2012 года, когда я поднималась в подъемнике-клетке на 34-й, а затем на 69-й этаж, я не переставала смотреть на стену здания и не отваживалась выглянуть наружу и вниз, но я не переставала размышлять о том, что без лифтов «Осколок» – да и любой небоскреб – попросту не мог бы существовать. Одной из причин, по которым древнеримские *инсулы* не строили выше десяти этажей, было то, что ходить по лестнице еще выше просто неудобно. Сегодня мы так привыкли к тому, что нужно просто нажать кнопку и мобильная кабинка отвезет нас вверх или вниз на любой этаж башни, что ни на секунду об этом не задумываемся. Но до 1850 года лифты в таком виде, какими мы их знаем, еще не существовали. И хотя мы и начали строить небоскребы вскоре после изобретения лифта, это устройство изначально придумали не для многоэтажных зданий, а для более

безопасного перемещения материалов по зданию завода.

Как и Архимед, Элиша Отис обладал неуемным творческим воображением. Он сменил множество профессий – был и плотником, и механиком, и производителем каркасов кроватей, и владельцем фабрики – и изобрел автоматическое поворотное устройство, которое ускорило производство кроватей в четыре раза, новую систему железнодорожного стоп-крана и даже автоматическую печь для выпечки хлеба. В 1852 году его наняли навести порядок на заводе в Йонкерсе в штате Нью-Йорк, и, увидев, сколько усилий нужно для транспортировки материалов с этажа на этаж вручную, он стал думать о том, как можно выполнить эту работу с помощью механики. Методы перемещения людей и материалов с одного этажа на другой существовали веками: например, римские гладиаторы поднимались из ям Колизея на боевую арену на движущейся платформе. Но проблема была в том, что платформа небезопасна: если веревка, которая поднимает и опускает платформу, вдруг оборвется, то платформа упадет на землю и, вероятно, убьет своих пассажиров. Отис задался вопросом, как сделать так, чтобы этого не случилось.

Его идея заключалась в том, чтобы использовать в устройстве лифта рессору: элемент подвески в форме буквы «С», состоящий из уложенных слоями стальных полос, который применяли для лучшей амортизации в повозках и экипажах. Когда на рессору воздействует сила, она становится почти плоской, а когда сила ослабевает, рессора сгибается. Именно это изменение формы под действием силы Отис планировал использовать как преимущество. Первым делом он заменил гладкие рельсы (которые удерживали платформу на месте, когда она ездила вверх и вниз) на зубчатые рельсы. Затем он создал механизм, напоминающий футбольные ворота, с петлей посередине и ножками в основании. К веревке на крышке кабины лифта он приделал рессору, а потом эти ворота. Когда веревка была целой, рессора оставалась плоской, а ворота квадратными. Если веревку перерезали, то рессора сокращалась до формы буквы «С», давила на ворота и деформировала так, что две их ножки упирались в зубчатые рельсы, и лифт застревал.

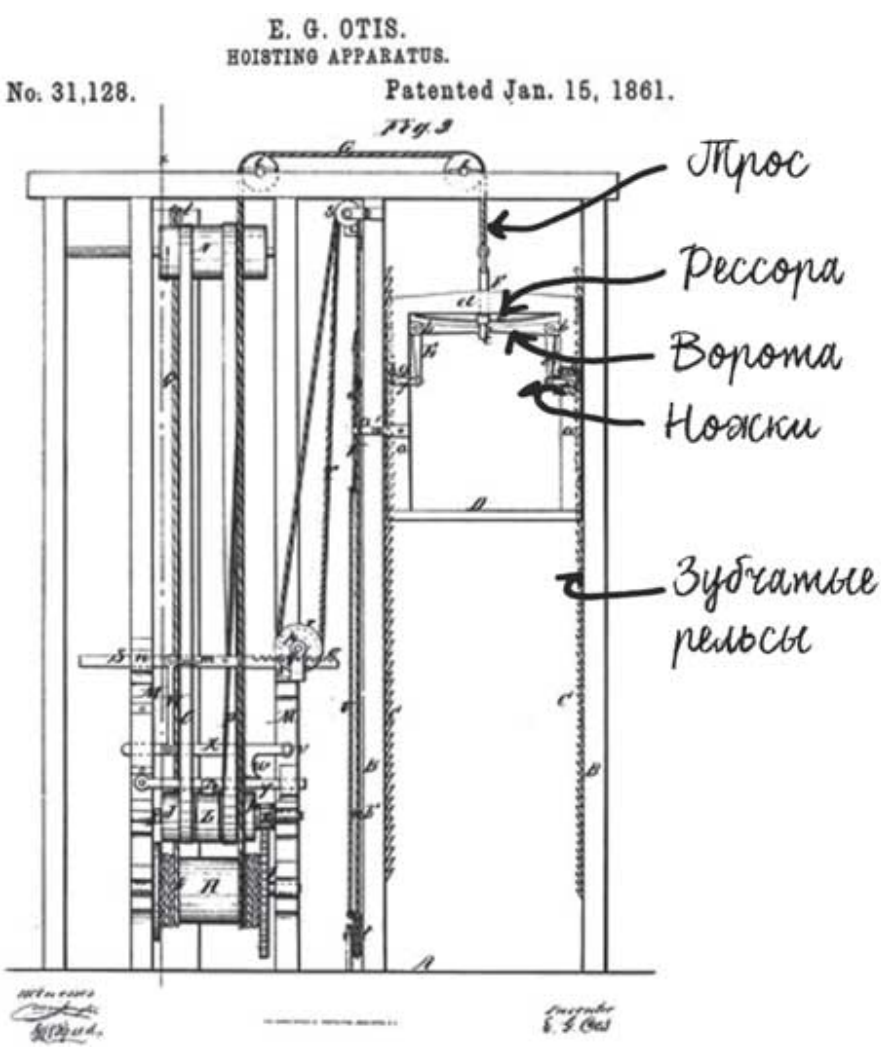


Рессора решила проблему управления лифтом

Но для того чтобы представить свое изобретение общественности и продемонстрировать его работу, Отису нужна была большая сцена – и он нашел ее на Всемирной выставке 1853 года в Нью-Йорке. Мероприятие называлось «Выставка промышленности всех стран» и было призвано продемонстрировать американскую технологическую мощь и промышленные инновации со всего мира. В просторном выставочном зале Отис соорудил свой лифт с зубчатыми рельсами, рессорами, платформой и подъемным механизмом, а на платформу положил грузы. Когда собрались зрители, он встал на платформу и поднял ее на максимальную высоту. На глазах у посетителей выставки он велел перерезать веревку подъемного механизма, и его помощник взмахнул топором.

Люди с ужасом затаили дыхание, когда платформа внезапно полетела вниз. А потом она так же внезапно остановилась. Упала она всего на несколько сантиметров. Отис крикнул: «Все в порядке, господа. Все в порядке».

Четыре года спустя Отис установил свой первый безопасный подъемник с паровым механизмом в пятиэтажном универмаге «И-Ви-Ховут и Ко» на углу Бродвея и Брум-стрит в Нью-Йорке. Основанная им компания, которая носит его имя, до сих пор производит лифты и эскалаторы для зданий по всему миру, от Эйфелевой башни и Эмпайр-Стейт-Билдинг до башен Петронас в Малайзии. Такие здания вряд ли существовали бы, если бы не изобретение Отиса. Пока он не придумал безопасный подъемник, высота зданий ограничивалась количеством лестничных пролетов, которые человек готов пройти. Появление лифта устранило это препятствие, и инженеры начали думать о настоящих небоскребах.




Эта схема входит в пакет документов, которые представил Отис для получения патента на свой лифт, или «подъемный аппарат»

С тех пор мы строим все выше и выше, и теперь перед нами встает другая проблема: мы не умеем создавать лифты, которые проезжали бы больше 500 м, потому что стальные тросы, на которых они держатся, становятся слишком тяжелыми для эффективной работы оборудования. Это одна из причин, почему лифты часто не поднимаются на самый верх высоких башен. Нужно проехать несколько этажей, потом сесть на другой лифт и уже на нем подняться на самый верх. Но инженеры уже изучают пути решения этой задачи, используя различные материалы. Замена стали углеродным волокном, которое прочнее и при этом легче, кажется шагом вперед, но остаются сомнения в том,

насколько углеволокно огнеупорно. Наши башни растут, и подобные инновации нам очень нужны.

Еще одна проблема сверхвысоких башен – колебания. В первой главе мы говорили о том, как мы контролируем движение зданий так, чтобы нас в них не укачивало. Но есть еще одна причина, по которой нам нужно контролировать колебания. Лифты ездят по прямым рельсам, и при движении башни лифт смещается, а рельсы гнутся. Небольшое сгибание не представляет проблемы: винты и застежки кабины лифта позволяют ей незначительно деформироваться, – но если они согнутся слишком сильно, то кабина застрянет и не сможет сдвинуться. Чем выше становятся здания, тем больше они двигаются и тем больше сдвигается кабина лифта. У этой проблемы есть решения, от модернизации самих лифтов до еще большего расслабления фиксаторов и до остановки лифтов в сильную грозу. Уверена, что в конце концов какой-нибудь Отис наших дней придумает свое оригинальное решение. И ему – или ей – придется это сделать, потому что лифт стал неотъемлемой частью нашей жизни. За каждые 72 часа на лифтах успевает проехать число людей, равное населению нашей планеты.

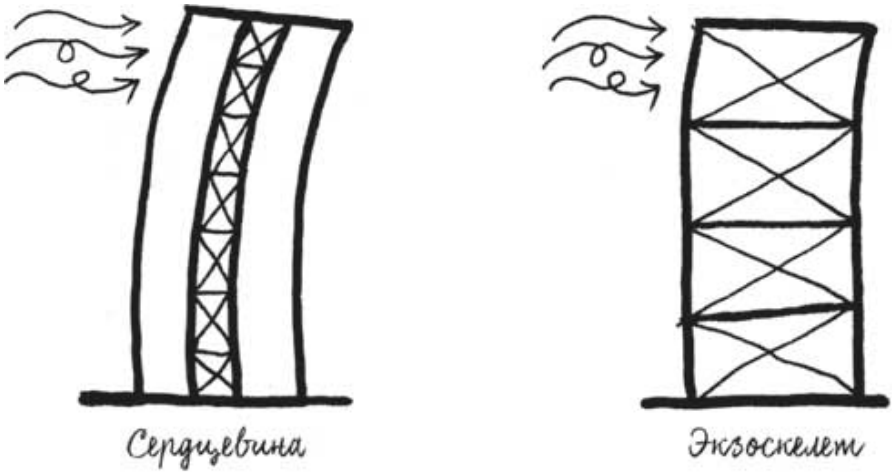
Я вспомнила об Элише Отисе, когда была в «Бурдж-Халифе» в Дубае, самом высоком здании в мире (829,8 м), потому что его компания установила лифты, которые как раз должны были отвезти меня на смотровую площадку на 124-м из 163 этажей. Это была гораздо более спокойная поездка, чем подъем по стене самой высокой башни в Западной Европе в подъемнике-клетке, несмотря на то что номер этажа на ЖК-дисплее менялся удивительно быстро, потому что поднимались мы со скоростью 36 км/ч. (Оригинальный подъемник Элиши Отиса в универмаге «И-Ви-Ховут и Ко» ехал со скоростью всего 0,7 км/ч.) Через минуту передо мной открылся невероятный вид. С одной стороны, там, где кончались дома, до горизонта простирался бесконечный песок. С другой стороны я увидела синее море, а вдалеке слева группу искусственно созданных островов в форме листа Палм-Джумейра. Взяв себя в руки и ощутив себя под защитой стекла, из которого было сделано все, от пола до потолка, я отважилась подойти ближе к краю и посмотреть вниз. Подо мной было несколько крошечных футуристических зданий, напоминающих с этой высоты фигурки на макете в научно-фантастическом кино. Я испытала шок, осознав, что эти здания внизу, вообще-то, выше большинства небоскребов Европы и даже США. Рядом с «Бурдж-Халифой» все остальное кажется каким-то карликовым, и это играет злую шутку с нашим восприятием пропорций.

«Бурдж-Халифа» в Дубае, на 2018 год самое высокое здание в мире, существование которого стало возможно отчасти благодаря развитию технологий лифтов

«Мегавысокие» небоскребы вроде «Бурдж-Халифы» стали реальностью благодаря человеку, который в детстве был веселым

озорным мальчишкой, а родился в Дакке в Бангладеш в апреле 1929 года. Фазлур Хан не любил методы традиционного обучения: на его пытливые вопросы учителя отвечали сухостью, и в результате он не слишком серьезно воспринимал образование (даже несмотря на то, что его отец был учителем математики). К счастью, терпеливый и дальновидный отец понял, что сыну нужно более широкое образование, и решил поощрять его интеллектуальное любопытство, попутно прививая ему дисциплину. Он давал Фазлуру решать задачи, похожие на те, что были в школьной домашней работе, но заставляющие искать решения за рамками школьной программы. Кроме того, он предлагал Фазлуру решать одну и ту же задачу разными способами. Когда пришло время выбирать, что изучать в университете – физику или инженерию, – отец указал сыну на инженерию, потому что, по его словам, она требует дисциплины и ему всегда придется рано вставать на лекции. (На самом деле, насколько мне известно, физикам тоже приходится рано вставать на лекции.) В 1951 году Хан защитил диплом по гражданскому строительству в Университете Дакки с лучшими оценками на курсе, а в 1952 году поехал в США по стипендии Фулбрайта. За следующие три года он защитил две магистерские диссертации и получил докторскую степень, попутно изучив французский и немецкий языки.

Именно Хан первым придумал обеспечивать устойчивость здания не внутри, а снаружи, – и эту блестящую инновацию использовали при проектировании культовых зданий по всему миру, от Центра Помпиду и «Корнишона» до башен «Херст» и «Торнадо». Из больших диагональных балок он составил прочные треугольники и таким образом создал внешний каркас, чем как бы вывернул традиционные небоскребы наизнанку. Эту систему часто называют «трубчатой системой», потому что, подобно полой трубе, эта внешняя «кожа» здания усиливает его, хотя ей и не обязательно иметь форму цилиндра.




Альтернативная система устойчивости позволяет отказаться от традиционной сердцевины и вместо нее использовать экзоскелет

Первым проектом Хана с такой концепцией стал многоквартирный дом «Девитт-Честнат» в Чикаго. Но настоящим образцом этого нового метода служит чикагский «Центр Джона Хэнкока», построенный в 1968 году, который при высоте в 100 этажей (344 м) стал вторым по высоте небоскребом после Эмпайр-Стейт-Билдинг. Он представляет собой прямоугольный параллелепипед со слегка сужающимися фасадами, из-за чего наверху он уже, чем внизу. На каждом фасаде видно пять гигантских крестов друг на друге, которые составляют каркас здания. И пятьдесят лет спустя его броский дизайн выглядит современно и элегантно. Инновационное проектирование заработало Хану короткое и меткое прозвище «отец трубчатого проектирования небоскребов».

Внешний каркас – только одна из инновационных идей Хана. Помимо этого, он предложил объединять несколько таких скелетов в кластеры. Это напоминает пучок соломинок в руке: каждая соломинка – отдельная трубочка, которая до определенной степени сама сохраняет стабильность. А если связать много соломинок вместе, получится гораздо более прочная и устойчивая структура. В «Бурдж-Халифе» используется этот принцип. Посмотрите на перекрещивающиеся элементы здания и увидите, что у них характерная трехсторонняя форма, напоминающая листья или лепестки. (Они стали фирменным знаком здания: когда поднимаешься на лифте, то свет, проходящий через ряды этой формы, танцует на стенах, создавая причудливые узоры.) «Лепестки» на самом деле являются группами «соломинок», или трубок со своими собственными

экзоскелетами, которые в группе поддерживают друг друга. Такая взаимная поддержка отдельных деталей обеспечивает устойчивость всей башни, несмотря на огромную высоту.

Экзоскелет обеспечивает устойчивость «Центра Джона Хэнкока» в Чикаго

Ключ к высотному строительству в том, чтобы обеспечивать устойчивость снаружи, а не изнутри. Пожалуй, неустойчивее всего я чувствовала себя, когда единственный раз в жизни каталась на лыжах. Сначала инструктор не разрешал нам

пользоваться палками, так что мне пришлось учиться не падать, управляя только ногами. Скоро я устала считать, сколько раз я упала и сколько синяков я себе посадила в процессе, но как только мне удалось выпрямиться – хоть и ненадолго, – мне позволили взять палки. И как все сразу изменилось: когда я раскинула руки и стала сохранять устойчивость с помощью палок, у меня стало получаться стоять ровно гораздо дольше. Хотя палки гораздо тоньше, чем мои ноги, и не такие прочные, расставив их шире, чем ноги, я стала гораздо устойчивее.

Высотные башни с экзоскелетами устроены по тому же принципу: устойчивость с маленькой внутренней площади (как у моих ступней или у сердцевины здания) переходит на более широкую площадь (как балки экзоскелета), и таким образом можно добиться гораздо большей устойчивости. Вывернув здание наизнанку, мы открыли множество инженерных возможностей: когда строишь башню на 50–60 этажей, как это делали инженеры начала XX века, то нужно гораздо меньше материала, а значит, строительство будет стоить дешевле. А если использовать столько же материала, сколько для создания башен старого типа, то можно забраться гораздо выше в небо. Так что с 1970-х годов трубчатых башен становилось все больше: от Башни Банка Китая и оригинальных башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке до башен Петронас в Куала-Лумпуре, – и все они навсегда изменили наши горизонты и создали классические очертания современного города.

Каждый год изобретают новые строительные технологии, системы каркасов, растут вычислительные мощности, так что быть инженером-строителем сейчас невероятно интересно. Наши здания выросли в небо благодаря тому, чему мы научились у своих предшественников, и настолько же глубже стали наши знания. Сегодня я проектирую здания, которые не могли бы построить такие гениальные мыслители, как Леонардо да Винчи. А через 100 лет инженеры с легкостью будут выполнять задачи, которые я не могу решить сейчас. Мы с коллегами опираемся на тысячелетний опыт инженеров, подаренный нам Архимедом, Брунеллески, Отисом, Ханом и многими другими.

Думаю, что благодаря современным технологиям высота наших зданий уже не имеет пределов. За последние 4000 лет мы преодолели столько физических, научных и технологических ограничений, что при достаточно прочных материалах, достаточно широком фундаменте и на достаточно твердой земле – и, полагаю, при достаточном количестве денег – не вижу причин, по которым мы не можем подняться на любую высоту, на какую захотим. Настоящий вопрос вот в чем: насколько высоко

мы хотим подняться? Из-за широкого основания в середине огромных этажей, вероятно, будет мало дневного света. Массивные колонны и балки ограничивают жилое и рабочее пространство. А как насчет безопасности и удобства жителей: сколько времени им придется ждать лифт и как эвакуировать десятки тысяч человек из такого огромного здания?

Технологии, несомненно, решат эти вопросы. В лабораториях уже синтезируют сверхпрочные материалы вроде графена, краны становятся все больше, а новые методы, вроде строительства «сверху вниз», постоянно совершенствуют. Наука и инженерия ведут нас к созданию меганебоскребов – «Ухань-Гринлэнд-Центра» (636 м) в Ухане в Китае, башни Мердека (682 м) в Куала-Лумпуре в Малайзии и напоминающей дротик башни Джидда в Саудовской Аравии, которая станет первым в мире зданием высотой в 1 км и строится с беспрецедентной скоростью.

Но когда мы остановимся?

Самый высокий этаж, на котором я когда-либо жила, – десятый, и мне очень нравился вид из окна, который открывался на мой город. Интересно, каково бы мне было жить гораздо выше. В городах вроде Гонконга или Шанхая тысячам людей довольно привычно жить на 40-м этаже. Наверное, в конце концов так будет везде: люди массово перебираются в города, и строить вверх – хороший способ вместить всех нас во все более ограниченное пространство.

Быстрый рост высоты зданий в прошлом веке едва ли дал нам время задуматься, *нравится* ли нам находиться так высоко над землей. Теперь же, вместо того чтобы мчаться ввысь, мы можем остановиться и подумать, чего мы по-настоящему хотим. Речь идет о том, что мы *хотим* построить, а не о том, что мы *можем* построить. После всплеска строительства высотных задний в 1960–1980-х годах архитекторы и инженеры задаются вопросом, какие здания лучше всего для людей и окружающей среды. Культурные факторы тоже играют роль: разные страны находятся на разных этапах развития городов, и у нас могут отличаться взгляды на то, стоит ли двигаться только вперед и вверх. Думаю, в какой-то момент в будущем средняя высота наших башен достигнет некоторого плато. Конечно, знаковые башни по-прежнему будут строить, и они постоянно будут бить рекорды. Но в конце концов человеческая природа начнет удерживать нас от покорения мегавысот. Мы хотим, чтобы у нас дома был солнечный свет и свежий воздух, и хотим чувствовать связь с землей и своими корнями. Мы поднимаем голову, смотрим на свои здания и восхищаемся ими, но нам нужно и заземляться.

# Глава 8. Земля

Город Мехико построен на озере.

Сначала он был небольшим островком, но постепенно стал расширяться.

Теперь город простирается далеко за пределы своей первоначальной территории, но его центр, где стоит большинство исторических ацтекских и испанских построек, по-прежнему расположен на озере. В 28 метрах под землей почва твердая и крепкая. Все, что поверх, – это рыхлый грунт, который добавили позже, и в результате получилось нечто очень мягкое, очень сырое и очень слабое. Мне описали это как «чашу желе со зданиями на поверхности».

Поэтому исторический центр Мехико тонет. И очень быстро. За последние 150 лет он погрузился в землю более чем на 10 метров – это больше высоты трехэтажного дома.

Город Мехико, построенный на озере

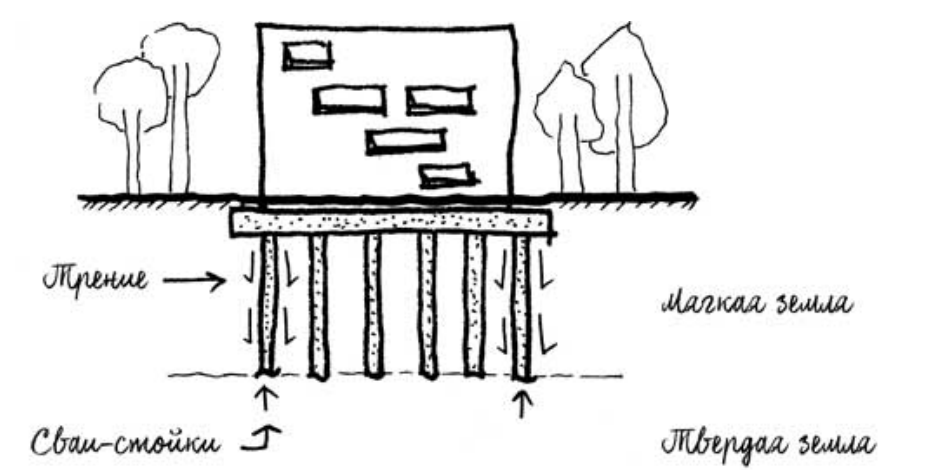
Когда меня пригласили в Мехико рассказать о своей карьере и проектировании высотных зданий, я не упустила эту возможность, отчасти потому, что мне хотелось посетить там много разных мест: Национальный музей антропологии, парк Чапультепек, древние пирамиды Теотиуакана и, конечно, Торре-Латиноамерикана, когда-то самый высокий небоскреб в Мехико и по-прежнему одно из лучших мест, где можно насладиться видом на бескрайние просторы мегаполиса. Естественно, мне также хотелось изучить уникальную почву, на которой стоит город, и ее странное воздействие на здания.

В инженерии то, что находится под поверхностью, так же важно, как то, что мы видим снаружи. Ведь можно построить большое красивое здание (то, что мы видим над землей), но если его не поддерживает хорошо спроектированная устойчивая структура (то, что находится под землей), если слои и состояние

почвы, на которой мы строим, изучили недостаточно, если этой почвой не пользоваться соответственно, то и все здание не будет устойчивым. В результате может получиться падающая Пизанская башня. (Я бы и хотела, чтобы туристы приходили смотреть на мое здание, но уж точно не потому, что оно падает.) Я знала, что в Мехико условия для строительства одни из самых сложных в мире из-за его почвы, – к тому же там еще наблюдается сейсмическая активность, поэтому решила, что эта поездка – потрясающая возможность услышать от самих экспертов, как им удается сохранять устойчивость городских зданий.

Место закладки города определило видение. Ацтекам явился их бог Уицилопочтли (бог войны и солнца) и велел переселиться с высокогорного плато на новое место, а столица должна находиться там, где они найдут орла со змеей в клюве, сидящего на верхушке кактуса нопали (это изображение стало эмблемой их национального флага). Ацтеки начали поиски и примерно через 250 лет нашли орла из божественного предсказания. Тот факт, что орел сидел на крошечном острове посреди озера Текскоко, их, кажется, не беспокоил (хотя я легко могу представить, как инженеры их племени проклинают свою новую водную строительную площадку на чем свет стоит).

Теночтитлан, что означает «место кактуса нопали», был основан в 1325 году. В период своего расцвета это был прекрасный город с плодородными садами, каналами и величественными храмами, а его правители повелевали обширными землями. Чтобы соединить город-остров с сушей, ацтеки построили три большие дамбы, забив бревна вертикально в озеро, а сверху насыпав землю и глину, чтобы получилась дорога. Сейчас эти дамбы служат основными дорогами, проходящими через исторический центр города.



Сваи, на которых здания держатся в мягкой почве

Эти бревна – пример *свай*. Они бывают разных форм и размеров, но устроены по общему принципу: это колонны, погруженные глубоко в землю, которые поддерживают постройку наверху. Если земля слишком мягкая и недостаточно сильная, чтобы выдержать вес постройки, сваи распределяют этот вес таким образом, что почва не испытывает чрезмерной нагрузки. Древние племена использовали стволы деревьев, а современные сваи, на которых держатся более крупные строения, обычно представляют собой бетонные столбы цилиндрической формы или, реже, стальные трубки или столбы в форме буквы «Н» или трапеции. Фундамент здания закладывают поверх свай, и он соединяется с ними стальными плитами.

Сваи могут направлять силы в землю двумя способами: через трение между поверхностью сваи и почвы (висячие сваи) или напрямую через основание (сваи-стойки). В зависимости от веса и типа строения на поверхности свай может быть разное количество, и они могут быть разной длины в зависимости от сил, которые на них действуют, и типа почвы, в которую их погружают.

Висячие сваи работают за счет силы трения между поверхностью сваи и почвой, в которой они распределяют вес постройки. Чем больше свай, тем больше площадь их поверхности в контакте с почвой и тем больше трения. Эта сила трения сопротивляется весу: если взглянуть на нее с точки зрения третьего закона Ньютона, то это сила, направленная вверх и возникающая как противодействие силе притяжения здания, направленной вниз.

Иногда почва слишком слабая для создания трения, и тогда используют сваи-стойки. Их делают достаточно длинными, чтобы они погружались в более глубокий и более плотный слой почвы. Нагрузка в сваях воздействует на их основание и переходит в землю.

На самом деле, сваи не обязательно должны быть либо висячими, либо стойками: они могут выполнять обе функции. Некоторые виды почвы, например глина, хорошо взаимодействуют с помощью силы трения и крепко держат сваи. Но если нагрузка слишком большая, а места недостаточно, то одной силы трения для сопротивления недостаточно. В этом случае сваи можно сделать настолько длинными, чтобы они доставали до более плотного слоя грунта. В Лондоне, например, весьма компактный слой песка глубиной около 50 м, который мы проходим насквозь для укрепления крупных зданий.

Инженерам важно рассчитать, сколько для строительства нужно свай и какого размера. Мы основываемся на отчете об исследовании почвы, в котором сказано, какие слои находятся под местом постройки и насколько они глубокие и плотные. Тогда, если я пойму, что одного бетонного фундамента недостаточно, чтобы здание не утонуло, я предпочту сваи. С помощью информации в отчете – и геотехнических инженеров – я могу рассчитать, насколько глубоко нужно поместить сваи, чтобы они зашли в твердый слой почвы, и каковы свойства всех слоев при трении.

Затем мне нужно выбрать диаметр. Свая меньшего диаметра лучше тем, что она дешевле и легче устанавливается, но она может оказаться недостаточно сильной. У сваи большего диаметра больше площадь поверхности, что увеличивает силу трения. Площадь ее основания тоже больше, а значит, и сама свая сильнее. С помощью расчетов я нахожу нужный компромисс. Я выбираю диаметр, рассчитываю, сколько нагрузки придется на одну сваю с выбранной длиной, а затем делю общий вес здания на силу, которую выдерживает одна свая, и получаю число свай, которые понадобятся. Если это количество свай можно разместить под фундаментом, то мы переходим к следующему шагу. Если нет, то я увеличиваю размер сваи и делаю расчеты заново. Для постройки 40-этажной башни возле Олд-стрит в Лондоне мы изготовили около 40 свай диаметром от 0,6 м до 0,9 м, и некоторые из них, в местах наибольшей нагрузки, были длиной более 50 м. Многие современные небоскребы стоят на сваях, которые работают на одном только трении (если почва достаточно хороша и выдерживает нужную нагрузку). Но эта башня стоит и на висячих сваях, и на сваях-стойках, потому что лондонская глина до определенной глубины довольно слабая.

Поместить сваи в землю – очень непростая задача. Огромные сваи стало возможно устанавливать совсем недавно благодаря современной механизации. Обычно сваи устанавливают с помощью буровой установки, напоминающей гигантский штопор, который закручивают глубоко в землю, затем вынимают вместе с почвой, а полученное отверстие заполняют бетоном. Когда бетон еще сырой, в него погружают стальную клетку, чтобы усилить сваю. Многие столетия, еще до механизации, большинство инженеров просто забивали сваи в землю, как это делали ацтеки на озере Тексоко. С инженерной точки зрения их постройки были успешны и уверенно простояли еще два столетия.

Но потом прибыли иностранцы.

В 1521 году испанцы захватили Теночтитлан и сровняли его с землей, а затем отстроили город заново на фундаментах

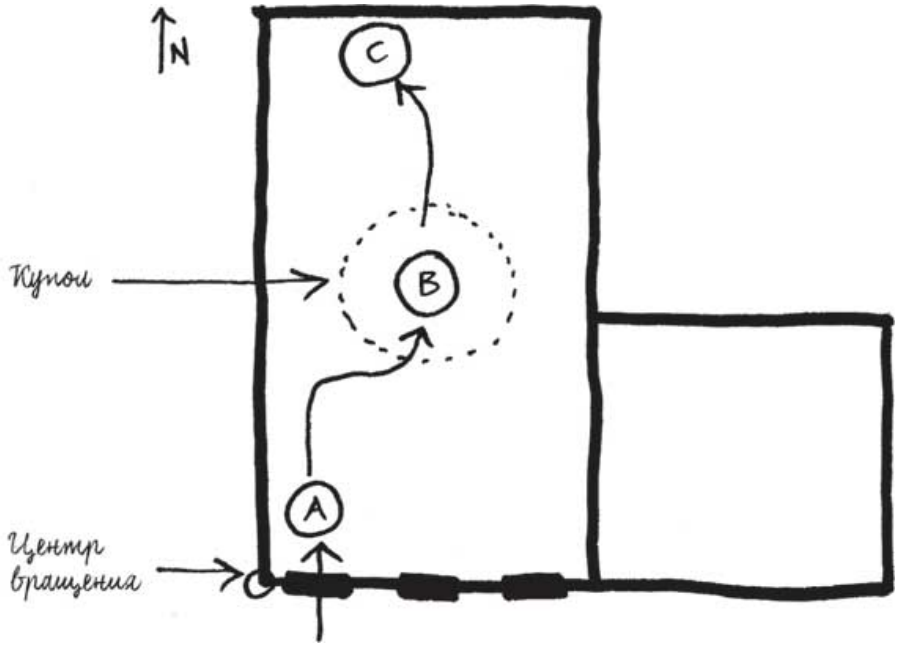
ацтекских храмов-пирамид. Они вырубили деревья вокруг озера, чем вызвали глиняные оползни и эрозию, из-за которых озеро обмелело. Уровень воды поднялся, и в XVII–XVIII веках город часто страдал от наводнений, приносящих разрушения и хаос (после наводнения 1629 года город оказался под водой на пять лет). В конце концов озеро засыпали землей, чтобы расширить город, но он по-прежнему регулярно страдал от наводнений из-за высокого естественного уровня воды в почве.

В земле есть определенный уровень, под которым проходят естественные потоки воды, которые насыщают землю: его называют *уровнем грунтовых вод.* Если выкопать яму в месте, где высокий уровень грунтовых вод, то эта яма довольно быстро будет заполняться водой: таким первоначально и было озеро Текскоко. Если яму заполнить землей – как заполнили озеро Текскоко, – а потом поливать почву водой, имитируя дождь, то постепенно вода начнет скапливаться на поверхности земли (так же как лужи образуются у нас в саду, потому что почва насыщена водой). Так произошло и с Мехико. Озеро заполнили землей, но воде было некуда деться. Когда шел дождь, то почва перенасыщалась влагой, которой в ней и так было много из-за грунтовых вод, и вода скапливалась на улицах города. Наводнения стали контролировать только в XX веке с помощью огромной сети туннелей, по которым уводили избыток воды. Но традиции строительства на столь непредсказуемой и нестабильной земле по-прежнему прослеживаются в современном городе.

Кафедральный собор, Мехико

Стоя во дворе огромного серого Кафедрального собора Мехико, я искала в толпе доктора Эфраина Овандо-Шелли, геотехнического инженера, который, судя по фотографии, носил солнечные очки и одежду цвета хаки и немного напоминал Индиану Джонса. Стройные твердые колонны собора резко контрастировали с изящной резьбой между ними, но по-настоящему мое внимание как инженера привлекли трещины в здании. Я увидела черное пространство, открывшееся в слоях раствора и каменной кладки, а две массивные колокольни по бокам от главного входа казались не совсем вертикальными. Но мои мысли прервал доктор Овандо-Шелли, который явился точно в назначенное время в солнечных очках, поздоровался со мной, дал свою книгу и повел меня к собору на очень необычную экскурсию.

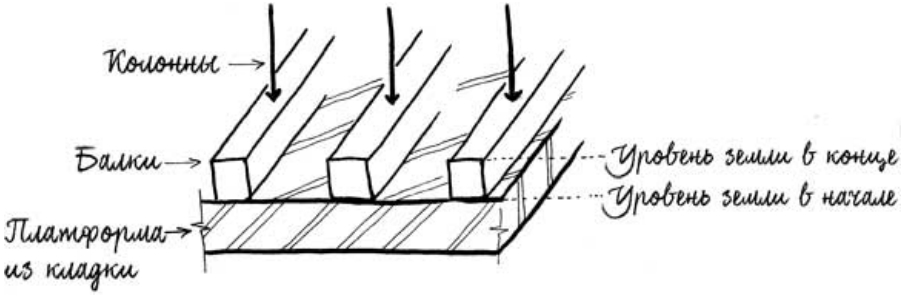
Как только мы вошли в собор *(см. карту, точка А),* кое-что показалось мне очень странным. Толпы туристов замерли перед величием этого места, а верующие сидели, почтительно наклонив головы, на полированных деревянных скамьях. Но мое внимание привлек пол. Мы двигались к задней части собора, словно поднимаясь в гору. И так и было – из-за неравномерного оседания почвы, которое исторически происходит на этом месте, пол собора поднимается вверх.




Карта Кафедрального собора

Строительство собора началось в 1573 году на фундаменте ацтекской пирамиды. Архитектор Клаудио де Арсиньега знал об особенностях почвы и спроектировал хитрый фундамент. Первым делом он поместил более 22 тысяч деревянных кольев – 3–4 м длиной – в почву, чтобы «сцепить» ее в единое целое. Представьте ящик с песком, в который опустили множество шампуров с заданным рисунком. Если встряхнуть ящик, то песок движется по нему уже гораздо меньше, чем если бы в нем не было шампуров. Колья выполняли не совсем ту же функцию, что сваи, потому что они были рассчитаны не на то, чтобы выдерживать вес собора, а всего лишь на укрепление почвы.

После этого строители возвели поверх кольев массивную кладку. Ее размеры – 140 × 70 м, она примерно той же ширины, что футбольное поле, но в полтора раза длиннее, а толщина около 900 мм. На эту кладку уложили массивные балки – особым орнаментом наподобие вафли – таким образом, чтобы колонны и стены собора опирались на них. Верхняя поверхность балок расположилась на уровне пола собора и распределила вес колонн по кладке, а та, в свою очередь, передала нагрузку земле. Такой тип фундамента (с балками или без) называется сплошным.




Слои, составляющие сплошной фундамент собора

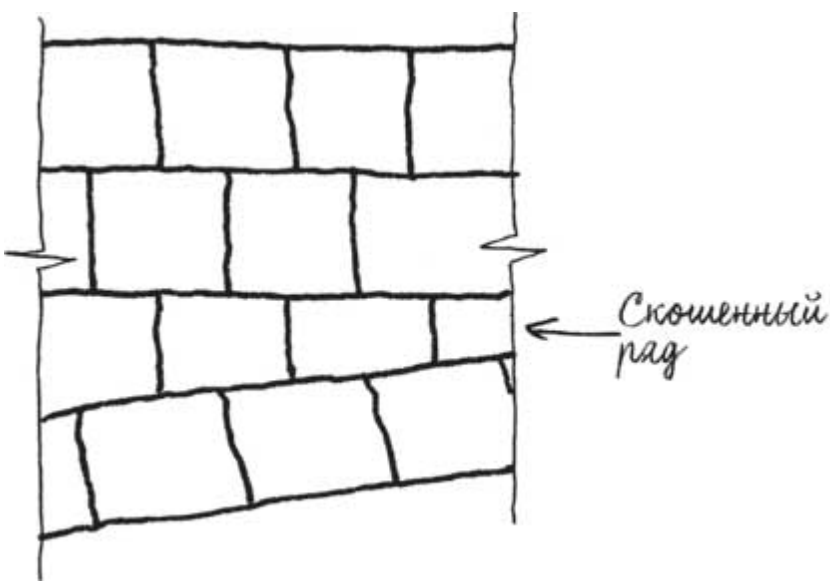
Функция такого фундамента соответствует названию: он покрывает всю поверхность земли под постройкой. При строительстве на мягкой почве главное – не сосредоточивать большую нагрузку на маленькой площади. Это все равно что наступить на глину тонкими шпильками. Многим приглашенным на летние свадьбы знакомо ощущение, когда тонкий каблук тонет в земле, так как он оказывает на нее большое давление (его можно вычислить, разделив силу на площадь поверхности). Обувь на плоской подошве так просто не увязнет, потому что та же сила распределяется на гораздо большую поверхность – по этому принципу работают снегоступы. Таким образом, платформа из кладки выступила в роли туфель на плоской подошве, и вес здания распределился на большую поверхность. Но проблема в том, что иногда земля такая мягкая, что даже распределения веса здания на большой поверхности во избежание точечной нагрузки оказывается недостаточно.

Вероятно, стоит отметить, что ни висячие сваи, ни сваи-стойки не предназначались для поддержки веса здания. Возможно, из-за фундамента древней пирамиды, а может, потому, что инженеры того времени понимали, что если сваи будут доходить до твердого слоя почвы, то собор, наоборот, может начать подниматься. И в самом деле, колонна с Ангелом Независимости в городе Мехико (возведенная в 1910 году) стоит на сваях, и за сто лет к ее основанию пришлось добавить 14 ступенек, потому что она растет относительно улицы. Инженеры в Мехико согласны с тем, что лучше давать городским постройкам медленно, стабильно и равномерно тонуть, чем расти.

Когда собор построили, то верх кладки совпадал с уровнем земли. На фундаменте стояли балки глубиной 3,5 м, а сверху на них опирался уже сам пол собора. Таким образом, изначальная постройка находилась в 3,5 м над землей, то есть инженеры предусмотрели, что здание утонет, и планировали, что к окончанию строительства оно как раз утонет до того уровня, чтобы пол сровнялся с землей. Они надеялись, что здание утонет

равномерно и без повреждений. Несмотря на усилия де Арсиньеги, во время строительства, так как на тяжелый камень сверху укладывали тяжелый камень, здание начало тонуть неравномерно. Юго-западный угол собора (на диаграмме левый передний угол) утонул глубже, чем северо-восточный. Чтобы скомпенсировать эту неравномерность, строители увеличили толщину 900-миллиметровой кладки с южной стороны.

Причина того, что платформа осела неравномерно, кроется в том, что у почвы есть свой багаж. Недостаточно просто познакомиться с почвой и спросить, как она себя чувствует, в день начала строительства, а потом предполагать, что какие-нибудь ее переживания из прошлого никак не отразятся на дальнейшем поведении. У нее есть история и характер, которые инженер должен принимать во внимание. Ацтеки построили свою пирамиду как раз в том месте, где находится собор, со временем добавляя почве новые слои, отчасти по религиозным причинам, а отчасти для того, чтобы возместить ущерб, нанесенный поселением. Эта постройка оказала влияние на физическое состояние почвы: некоторые зоны и так находились под давлением, и они уплотнились, а другие, на которые не было нагрузки, остались менее плотными. В тех местах, где новый фундамент опирается на уплотненную почву, он утонул не так сильно, а та его часть, которая построена на менее плотной почве, опустилась гораздо глубже.



Попытка перестроить фундамент

Даже после того как испанские строители закончили

фундамент, постройка продолжила двигаться неравномерно. Они пытались скомпенсировать движение, изменив угол наклона здания. Доктор Овандо-Шелли указал на зоны, где слои каменной кладки (которые обычно идут горизонтально друг над другом) сужаются с одного края. Это помогло строителям выровнять постройку после того, как уже уложенные слои камня наклонились. Для сопротивления продолжающемуся проседанию внесли и другие изменения: колонны в южной части здания были почти на метр выше, чем в северной. Строительство собора завершилось лишь через 240 лет, но и в течение этого времени, и потом здание постоянно и непредсказуемо двигалось.

Мы с доктором Овандо-Шелли прошли по одному из проходов *(см. карту на стр. 135, точка B)* и остановились прямо под центральным куполом. Здесь висит гигантский маятник (или *отвес*), по форме напоминающий ракету, из блестящей латуни и стали, который показывает, насколько сдвинулся собор. Модель такого отвеса можно сделать из веревки, небольшого груза и прозрачной пластиковой коробки. Груз нужно прикрепить к концу веревки, подвесить его к середине крышки коробки, а коробку поставить на ровную поверхность стола. Мы увидим, что отвес находится ровно над центром коробки. А если коробку слегка наклонить, то отвес будет указывать уже не на середину. Наклоните коробку на 45°, и отвес будет указывать на угол между полом и стеной. Отвес в Кафедральном соборе Мехико устроен таким же образом: фундамент сдвигается, а отвес продолжает показывать вертикаль. Отмечая, куда указывает отвес и куда движется его проекция, можно отслеживать, как наклоняется собор.

В 1910 году провели измерения для сравнения уровня двух противоположных углов. Инженеры установили, что с 1573 года пол собора так сильно поменял наклон, что один угол оказался на 2,4 м выше другого. Сложно представить здание, которое бы так сильно наклонялось. Неудивительно, что из-за этого целостность собора начала нарушаться. К 1990-м годам его колокольни опасно наклонились и могли обрушиться.

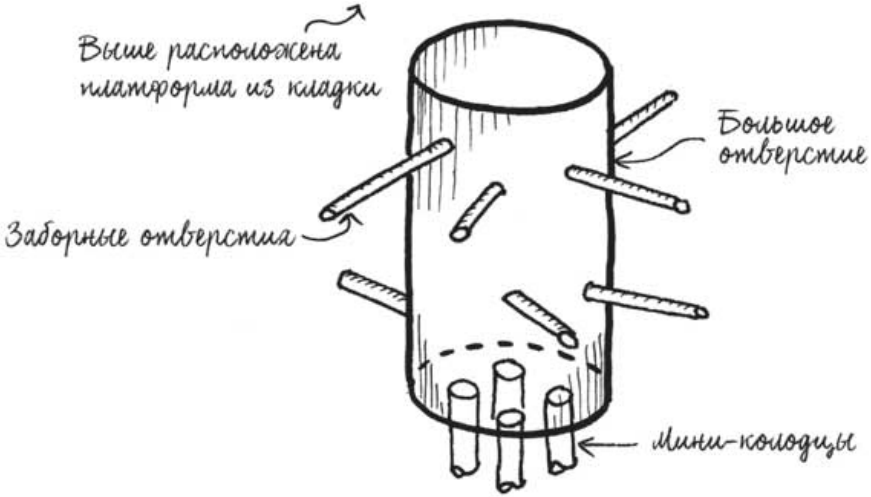
В 1993 году началась масштабная реставрация. Доктор Овандо-Шелли был членом большой команды инженеров, которые работали над этим проектом. Они пришли к выводу, что невозможно заставить здание перестать тонуть, зато, если заставить его тонуть равномерно, оно потерпит наименьший ущерб. Но, прежде чем думать о том, как сделать так, чтобы он тонул равномерно, им нужно было так выстроить опору всего собора, чтобы он встал относительно горизонтально.

По мере продолжения экскурсии мы прошли от середины к

задней части собора *(см. карту на стр. 135, точка С)*. Здесь до самого потолка простирается великолепный барочный золотой Королевский алтарь со множеством замысловатых фигурок ручной работы – роскошная стена для поклонения, предназначенная для того, чтобы захватывать дух, впечатлять и вызывать благоговение. Безусловно, алтарь вызывал благоговение.

Однако меня совершенно привлек крошечный металлический гвоздь на колонне слева от алтаря. Именно относительно этой точки команда производила измерения и сравнивала уровни пола, чтобы рассчитать, насколько собор нужно выравнивать. Точкой отсчета (выбранной точкой, которой нужно не позволить погружаться еще глубже) оказался юго-западный угол, потому что он утонул глубже всего. Металлический гвоздь находился в северном конце собора, и его нужно было опустить вниз на несколько метров. Даже от мыслей об этом у меня закружилась голова. И кружилась все то время, пока доктор Овандо-Шелли объяснял технологию, с помощью которой им удалось этого добиться. Смотрели научно-фантастический блокбастер *«Армагеддон»,* где Брюсу Уиллису и его команде нужно проделать отверстие в астероиде, начинить его взрывчаткой и предотвратить столкновение с землей? План, разработанный инженерами, которые реставрировали собор, казался таким же нереальным и сложным: им нужно было сделать подкоп под собор, чтобы почва осела. Сама мысль о том, чтобы *убрать* почву из-под здания, чтобы оно стало *устойчивее,* кажется, противоречит логике. Но для таких исключительных природных условий требуется исключительное инженерное решение.

Как я уже говорила, почва – это не только почва: нужно понимать ее историю, чтобы предсказать, как она поведет себя в будущем. Доктор Овандо-Шелли и команда провели целый ряд исследований почвы по всей площади собора, чтобы узнать, где она сильная, а где слабая, насколько она плотная и какую нагрузку испытывает. Они ввели эту информацию в компьютерную модель, составили трехмерную карту из слоев разного цвета, которые сменяли друг друга или наслаивались друг на друга в зависимости от силы и типа почвы на определенной глубине. Модель также воспроизводила все исторические события, повлиявшие на почву, – от постройки ацтекского храма и испанского собора до изменений уровня воды и т. д. – и создали профиль почвы.




Заборные отверстия, расходящиеся в стороны от основного отверстия

Команда проделала 32 цилиндрических отверстия диаметром 3,4 м и глубиной от 14 до 25 м в оригинальной кладке фундамента и в самой земле. Эти отверстия выкапывали вручную (находиться в них рабочим было и непросто, и опасно). На каждом этапе погружения диаметр отверстия заливали бетоном, таким образом создавая трубу, которая не дает двигаться почве. Когда работу с отверстием заканчивали, внутрь его тоже заливали бетон, чтобы получившаяся труба не разрушилась. В основании каждого отверстия инженеры выкопали четыре мини-колодца, откуда можно было откачивать излишки грунтовых вод, чтобы те не поднимались и не затапливали отверстия.

Но это не те отверстия, которые должны были спасти собор. Они служили вспомогательными базами, через которые выкопали еще около 1500 маленьких отверстий под небольшим углом к горизонту диаметром с кулак и длиной от 6 до 22 м, через которые можно было извлечь землю. По плану после извлечения лишней земли эти тонкие отверстия должны были сами со временем засыпаться, выровняв таким образом основание собора.

Так как северная сторона здания поднялась выше и именно ее нужно было ниже всего опустить, больше всего земли извлекли через отверстия с северной стороны, а с юго-западной извлекли меньше. Из одного только северо-восточного отверстия вынули более 300 кубометров земли, а из другого, в юго-западном углу, всего 11 кубометров. В общей сложности с помощью огромной системы отверстий и туннелей, прорытых под историческим собором, и около 1,5 миллиона операций по извлечению земли из-под здания вынули 4220 кубометров почвы – этого объема

было бы достаточно, чтобы заполнить полтора олимпийских бассейна.

Как вы уже догадались, землю удаляли внимательно и осторожно, поэтапно и довольно долго (четыре с половиной года). Все это время уровень положения собора строго контролировали, чтобы убедиться, что любое его движение находится в рамках инженерных расчетов. Арки и колонны внутри собора поддерживали стальные балки и подпорки, чтобы избежать повреждений от внезапных, непредвиденных или слишком сильных движений. В это же время из-под здания постоянно брали образцы грунта, проверяли на твердость и содержание воды и сравнивали с компьютерной моделью, чтобы убедиться, что реальность совпадает с прогнозами.

Разница в уровне пола между северо-восточной и юго-западной частями составляла более 2 м, но в 1998 году, когда северный край утонул примерно на метр, этот процесс приостановился. Несмотря на то что фундамент по-прежнему оставался немного наклонным, инженеры стали беспокоиться, что повредят здание. Наклон башен вернулся к показателю в пределах нормы, так что работы пока приостановили.

Большие цилиндрические отверстия оставили открытыми. Сейчас их затапливают грунтовые воды, но если в будущем они понадобятся – если собор снова начнет наклоняться, – то можно будет откачать из них воду и извлечь с их помощью нужное количество земли. Пока собор оставили на милость почвы, но на этот раз за ним ведется тщательное наблюдение.

В стратегических точках на территории собора расположены отвесы в стеклянных ящиках, с которых по беспроводному соединению данные передаются в лабораторию в Италии, где инженеры отслеживают поведение здания. Датчики давления измеряют нагрузку на колонны и проверяют, не меняется ли нагрузка слишком сильно. Если нагрузка изменится, это значит, что здание снова наклоняется, и на некоторые колонны действует большее давление, чем на другие. Доктор Овандо-Шелли сравнил собор с лабораторией, в которой уже почти двадцать лет собирают данные. Теперь это не только религиозный, но и научный памятник.

С 1990-х годов собор тонет примерно на 60–80 мм в год – по сравнению с прошлым, это медленное, стабильное и, что самое важное, однообразное движение. Движение продолжится и в будущем, но со временем оно может замедлиться. Индиана Джонс инженерии спас свою реликвию и успешно выполнил миссию. Для Кафедрального собора Мехико Армагеддон теперь не настанет.

Новаторскую работу команды инженеров изучают по всему

миру. В 1999 году они работали совместно с инженерами в Италии и применяли свои методы к Пизанской башне. В Мехико условия были экстремальные: явно плохое состояние почвы, ее изменчивость и огромный размер собора. Большой плюс их работы в том, что у нас теперь есть бесценные знания, которые инженеры могут использовать в будущем, особенно в том, что касается сохранения наследия, а также строительства во все более суровых условиях, так как население растет, а климат меняется.

Наша техническая экскурсия закончилась, и мы с доктором Овандо-Шелли отправились на поиски ресторана, где можно пообедать, и перешли площадь Сокало, на которой были и другие искусно спроектированные и украшенные здания, которые неравномерно утонули в земле. Доктор терпеливо подождал, пока я сфотографирую дверные проемы, превратившиеся из прямоугольников в параллелограммы.

На террасе с видом на площадь Сокало официант принес нам ледяные «Маргариты». «У земли нет никакого понятия о чести, – сказал доктор Овандо-Шелли, чокаясь со мной, – как и у геотехнических инженеров». Он громко расхохотался. На мой взгляд, его работа как раз и была делом чести. Вместе с командой инженеров он спас величайший собор в Америке от разрушения. А на обед он угостил меня курицей *в шоколадном соусе.*

# Глава 9. Пустота

Обычно наши дома состоят из множества разных материалов – мы собираем все вместе, и из «ничего» получается «нечто». Но есть места, в бескрайних степях со скудной растительностью, где дома строили, наоборот, в полном отсутствии материала, – и там из «нечто» получалось «ничто».

Конечно же, мне было очень любопытно на это посмотреть, и потому в один прекрасный день я оказалась в полной темноте: я согнулась пополам, вытянула шею и щурилась, пытаясь разобрать, где я нахожусь. Я знала, что я глубоко под землей: я прошла вниз сотни извилистых и невероятно крутых ступеней, мимо древних гостиных, кухонь и смертельных ловушек и оказалась там.

Мне удалось понять только то, что я оказалась в узеньком проходе не шире гроба, потому что в нем у меня еле помещались плечи, а на уровне пола едва влезали ступни. Я даже не была уверена, что мне хватит места развернуться и выйти оттуда. Передо мной был сырой бежевый камень, но фонарика телефона едва хватало на то, чтобы освещать темноту за ним. Я аккуратно нащупала себе дорогу по этому проходу, стараясь не стукнуться головой. Через целую вечность (должно быть, на самом деле прошло всего несколько минут) я очутилась в маленькой освещенной пещере и испытала небольшое облегчение – правда, оно улетучилось, как только я увидела длинные прямоугольные углубления в полу, в которых некогда хранились останки тех, кому не повезло найти отсюда выход.

Я находилась в Деринкую, одном из самых больших и глубоко расположенных таинственных подземных городов в самом сердце Анатолии, на территории современной Турции. Существование этих городов сделали возможным три вулкана этого района – Эрджиес, Хасан и Мелендиз Даглари, – которые яростно извергались около 30 миллионов лет назад. Они покрыли весь регион десятиметровым слоем пепла, по которому текла лава и превратила его в *туф*. Местный климат – проливные дожди, сильные перепады температур и таяние снега весной – привели к эрозии мягкого туфа, так что от него остались одни колонны. Более плотные слои лавы на мягком туфе разрушались медленнее. Теперь прямо на тонких столбах из туфа лежат большие куски окаменевшей лавы, из-за чего они напоминают какие-то фантастические грибы, а называют их здесь «Камины Фей». Такой странный пейзаж словно выступает прелюдией к еще более странному зрелищу под землей.

«Камины Фей» – название, которое местные дали тонким колоннам из туфа, на вершине которых поместилась окаменевшая лава

Географически Анатолия располагается на пересечении Востока и Запада, и на протяжении всей своей бурной истории она была местом битвы разных цивилизаций. Хетты заняли этот регион около 1600 года до н. э., затем пришли римляне, после них византийцы и османы. Из-за непрекращающихся регулярных войн местные жители постоянно находились под угрозой. Хетты сообразили, что толстый слой спрессованного пепла у них под ногами относительно мягкий, а значит, из него можно вырезать с помощью молотка и зубила. Они стали строить подземные пещеры и туннели, где можно прятаться, пока на поверхности кипит битва. Каждая цивилизация после хеттов продолжала выкапывать туннели, и в результате получились целые подземные города, где несколько месяцев могли жить до четырех тысяч человек. За три тысячи лет в этом регионе появились сотни подземных городов. Большинство из них были небольшими, но примерно в 36 из них было два-три этажа.

Как я увидела в Деринкую, пещеры в этих подземных пространствах имели устройство муравейника: комнаты располагались не друг над другом, как у нас в домах, потому что тонкий слой туфа мог обрушиться. Помещения вырезали в пространстве в произвольном порядке, и они были разбросаны по большой территории. Арочные потолки помещений и проходов идеально подходили для поддержки камня силой сжатия, благодаря которой они не обрушивались. Через множество вентиляционных шахт, идущих от поверхности на 80 м в глубину, под землю поступал свежий воздух. Города были защищены от проникновения врагов – двери загораживали огромные валуны, в

земле были вырыты глубокие ямы-ловушки, а за дверями были устроены специальные каморки, где местные могли устраивать засады. Жители даже прорыли узкие туннели длиной до 8 км между соседними городами на тот случай, если врагам удастся пройти мимо хитрых ловушек.

Я рада, что мне не приходилось месяцами отсиживаться в Деринкую в страхе за свою жизнь, но, если подумать, я и правда очень много времени провожу под землей. В самом деле, с тех пор как я начала работать, я провела в общей сложности более пяти месяцев своей жизни глубоко в лондонской глине, потому что на работу я езжу на метро. Мне и миллионам других людей, которые теснятся в вагонах, как сельди в бочке, метро как бы напоминает, что в этом городе свободное место очень дорого. На улицах не вмещаются дома, офисы, тротуары, поезда, трамваи, машины и велосипеды – чего уж говорить о водопроводных и канализационных трубах, электрических проводах и интернет-кабелях. И с чего бы им там поместиться? В конце концов, мы ведь живем в трех измерениях, и нужно всеми ими пользоваться, строить и вверх, и вниз, а не просто расползаться в стороны. Город у нас под ногами – тоже огромная инженерная работа, но все эти скрытые артерии едва ли были бы возможны, если бы не обычный туннель. В Деринкую места было много, а туннели обеспечивали безопасность. В Лондоне и многих других мегаполисах места не хватает, а туннели обеспечивают решение этой проблемы.

В начале XIX века во всем городе через реку можно было перейти только в одном месте – по Лондонскому мосту, – и это чрезвычайно непрактично для мегаполиса, который быстрыми темпами разрастался по обе стороны Темзы. Время, которое нужно было потратить для перемещения по оживленному городу, ожидание перед опасным и мучительно медленным путешествием через реку по переполненному мосту, да еще и налоговый сбор за его переход – все это служило источником огромного разочарования. В 1805 году была учреждена компания, призванная обойти эту переправу и соединить доки в Уоппинге напрямую с заводами в Ротерхите.

Несмотря на то что эти точки находились друг от друга всего в 365 метрах, расстояние между ними достаточно велико, чтобы сделать строительство моста нецелесообразным, а это значит, что, чтобы добраться из одной из них до другой, людям и товарам приходилось делать большой крюк длиной в 6,5 км через Лондонский мост. Кроме того, из-за нового моста между доками и заводами высокие корабли не смогли бы подниматься выше по реке, а это ударило бы по торговле, которая как раз процветала в

городе. Единственным возможным вариантом было прорыть туннель под рекой. Проблема была в том, что создатели каналов, эксперты в строительстве шахт вроде Ричарда Тревитика и другие изобретатели уже пытались прорыть туннель, но у них не получилось. Попытки новой компании построить туннель под рекой также не увенчались успехом, пока один инженер не пришел к решению, на которое его натолкнул корабельный червь.

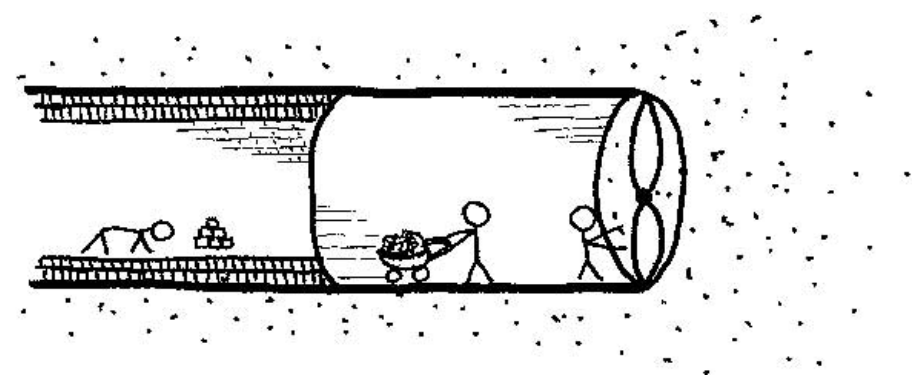
Марк Брюнель родился в Нормандии во Франции в 1769 году. Как второй сын в семье, он должен был стать священником, но проявлял больше интереса к рисованию и математике, чем к писанию, и поступил на службу в военно-морской флот. В 1793 году он бежал из Франции во время Французской революции и отправился в Америку, где со временем стал главным инженером города Нью-Йорка. Затем в 1799 году он переехал в Лондон, чтобы попытаться убедить адмиралтейство купить новую систему производства блоков, которую он изобрел. Он работал над различными проектами для вооруженных сил, разработал аппарат для массового производства солдатских сапог, а также лесопильное оборудование для доков Чатема и Вулвича. Но внимание компании по постройке туннеля под Темзой он привлек благодаря оборудованию для прокладывания туннелей, которое он изобрел (а потом активно агитировал за него представителей компании).

Брюнель носил в кармане увеличительное стекло. Во время работы в доке Чатема он взял кусок поврежденной доски, которую сняли с обшивки военного корабля, и стал пристально наблюдать за поведением *teredo navalis* (корабельного червя). У червя на голове было два острых рога, напоминающих ракушки, и, двигаясь и вращая рогами, червь перемалывал древесину в порошок. Измельченное дерево червь съедал и продвигался вперед на несколько миллиметров. Древесина проходила через пищеварительную систему червя и смешивалась с ферментами и химическими элементами в его теле. Затем эта смесь выходила из червя и образовывала тонкий слой пасты на стенках получившегося туннеля. При контакте с воздухом внутри образовавшейся полости паста затвердевала и укрепляла стенки туннеля. Медленно, но верно червь продвигался в древесине все дальше, оставляя за собой прочно облицованный проход.

Брюнель прекрасно знал о предыдущих попытках создания туннеля под рекой и вложил весь свой гений в новый план. Он понял, что может преуспеть в том, что не получилось у других, если применит в деле такой же процесс, какой он только что увидел. Он может построить подобие корабельного червя: механизм, который будет прорывать землю и оставлять за собой

туннель с крепкими стенами. Только этот червь будет из железа. И он будет гигантского размера.

По задумке Брюнеля, это должно было быть устройство с двумя лезвиями, как у *teredo navalis*, только в два раза выше человека. Лезвия будут располагаться на одном конце железного цилиндра, лежащего горизонтально (устройство немного напоминает вентилятор, который летом создает нам прохладу, только без защитной решетки). Группа мужчин будет проворачивать лезвия так, словно бы они ели землю. Цилиндр будет продвигаться вперед за счет гидравлических домкратов. Землю, которую срезают лезвия, вручную будут транспортировать в конец туннеля, почти как это делает червь. По мере продвижения вперед цилиндр будет оставлять за собой круглый туннель. Чтобы укрепить его стенки, каменщики выложат его кирпичом с использованием быстросохнущего раствора, и так за лезвиями образуется цилиндрический проход. Процесс таков: провернуть лезвия, вытащить землю, выложить проход кирпичом – это будет повторяться до тех пор, пока не получится длинный укрепленный туннель.



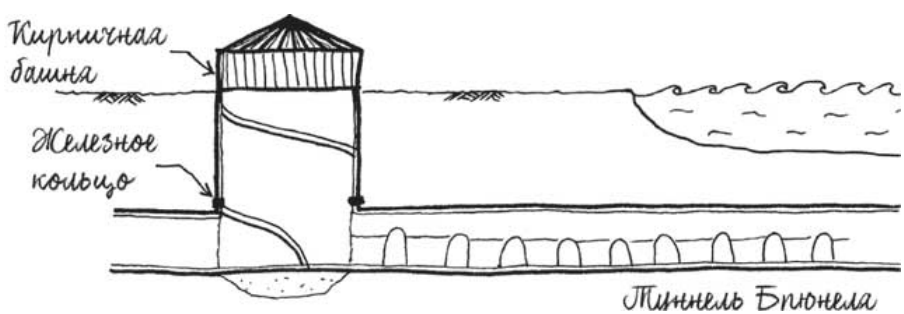
Корабельный червь Брюнеля

После разработки устройства Брюнелю осталось найти подходящий материал для бурения. Очевидно, что некоторые вещества копать легче, чем другие. Возьмем, к примеру, сухой песок. Если заполнить им круглую форму для выпечки и попытаться зачерпнуть половину так, чтобы получился полукруг, у нас ничего не получится, потому что песок сразу осыпется в образовавшееся пустое пространство. Таким же образом ведет себя очень сырой песок – из-за жидкого характера этот материал течет и заполняет пространство, которое мы только что освободили. Лондон расположен на слое глины, которому 50 миллионов лет. Если эта глина хорошо сжимается под слоями почвы и не слишком сырая, то получается довольно крепкий слой

земли. С точки зрения инженерии, это хороший материал, потому что его довольно легко рыть и вероятность его обрушения мала. Положите хорошую глину – спрессованную и не слишком сырую – в круглую форму и выньте половину. У вас получится идеальный полукруг. С другой стороны, лондонская глина бывает разной: она может быть песчаной, рыхлой, водянистой и нестойкой. Брюнелю для своего изобретения нужно было найти хорошую глину.

Он нанял двух гражданских инженеров, которые тщательно исследовали состав почвы. Они выходили на реку на лодке и погружали глубоко на дно железную трубку диаметром 50 мм, а потом вынимали ее. Затем они изучали вещества, попавшие в трубку, чтобы определить, какие слои почвы там находятся и какой толщины каждый. Через несколько месяцев исследований они представили Брюнелю результаты, а он решил, что земля пригодна для осуществления его плана и особых проблем возникнуть не должно. Прежде чем червь начнет копать, его нужно погрузить глубоко в землю.

2 марта 1825 года зазвонили колокола церкви Святой Марии в Ротерхите, и толпа людей собралась у скотного двора, чтобы взглянуть на необычайное зрелище. Посреди двора лежало огромное железное кольцо диаметром 15 м и весом 25 тонн. Заиграл духовой оркестр, и появились хорошо одетые леди и джентльмены, которые в этой убогой части Лондона смотрелись довольно неуместно. Под одобрительные возгласы толпы явился Марк Брюнель со всей своей семьей, и ему вручили серебряный мастерок, которым он возложил первый кирпич на вершину железного кольца. Брюнель повернулся к своему сыну Изамбарду, и тот заложил второй кирпич. Затем последовали торжественные речи, выпивка, тосты за науки и искусство, и народ отметил открытие туннеля под Темзой. Однако у восторженной толпы не было ни малейшего представления о том, с какими трудностями столкнутся эти самые науки в ближайшие месяцы.

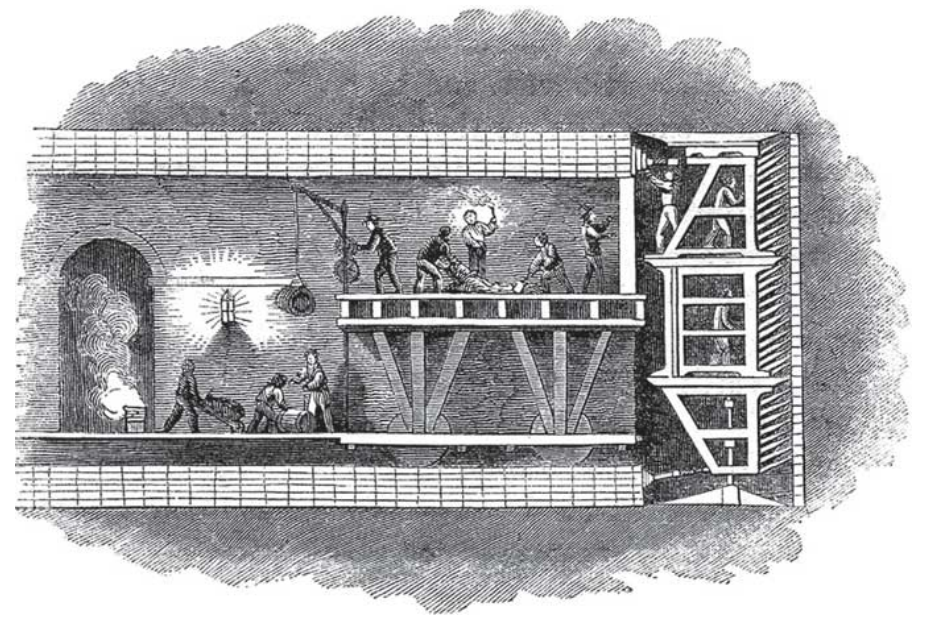



Строительство туннеля под Темзой, Лондон

Железное кольцо, которое видели зрители, напоминало острый край ножа для разрезания печенья. Два кирпичных кольца, разделенных слоем цемента и щебня, лежали на железном кольце и представляли собой цилиндрическую башню высотой чуть менее 13 м. На ее вершину строители положили еще одно железное кольцо, которое соединялось с нижними железными тросами, проходящими между кирпичными стенами. Наверху тысячетонного сооружения был закреплен паровой двигатель, который будет откачивать воду и вынимать вырытую землю.

Когда мы режем тесто для печенья, мы с силой вдавливаем его в тесто. А по задумке Брюнеля, его кирпичный нож должен был тонуть в земле под собственным весом: он был настолько тяжелым, что сам проваливался в мягкую почву. Медленно, но верно колонна стала тонуть на несколько сантиметров в день. По мере ее продвижения вниз землекопы вынимали землю из середины цилиндра, так же как мы вынимаем тесто из середины ножа для теста.

Застряв один раз, кирпичная колонна наконец опустилась до нужного уровня. Чтобы заложить фундамент, землекопы вырыли землю под нижним железным кольцом еще на 6 м. В этом пространстве каменщики выложили кирпичом три стороны колодца и пол, а одну сторону оставили. Как раз в эту сторону «червь» Брюнеля и будет рыть землю.



Проходческий щит, огромная машина, с помощью которой Брюнель и его рабочие прокладывали туннель

Пока они все это делали, Брюнель понял, что, в отличие от червя, который легко вращает лезвиями, у людей недостаточно сил, чтобы вращать лезвия этого аппарата. Он так и не придумал, как обеспечить мощность с помощью парового двигателя, зато ему в голову пришла другая идея. Он решил разделить свое устройство на небольшие секции – всего их было 36, – так чтобы в каждой из них мог работать один человек. Эту гигантскую машину он назвал «щитом».

В нем было 12 железных рам, каждая высотой 6,5 м, шириной 910 мм и глубиной 1,8 м. Каждая рама делилась на три ячейки, расположенные друг над другом. Двенадцать рам располагались рядом и составляли огромную решетку из 36 ячеек, в каждой из которых помещался один рабочий, и эти рабочие управляли щитом. С обеих сторон у каждого рабочего в ячейке были длинные тросы, идущие на равном расстоянии от пола до потолка. На них держалось примерно по 15 деревянных планок, расположенных одна над другой прямо перед работником и подпирающих землю перед щитом.

Рабочие трудились одновременно в чередующихся рамах (например, в рамах под номерами 1, 3, 5, 7, 9 и 11). Их задача заключалась в том, чтобы убрать одну деревянную планку, оттянув железные тросы, на которых она держится, выкопать ровно 11,5 см земли и закрепить планку в образовавшемся углублении с помощью железных тросов. Затем убрать следующую планку и проделать то же самое, и так до тех пор, пока все деревянные планки во всех 18 ячейках не встанут на новое место. Когда землекопы извлекли весь участок земли перед собой, домкраты в задней части щита продвигают ячейки вперед на 11,5 см.

На этом этапе ячейки с нечетными номерами оказывались на 11,5 см впереди по сравнению с четными. Теперь тот же самый процесс проходили рабочие в четных ячейках: убирали планки, выкапывали землю и ставили планки на новое место. Когда они заканчивали, четные ячейки оказывались впереди. Весь щит продвигался вперед на 11,5 см – ровно это расстояние требовалось для еще одного ряда кирпичной кладки.

За щитом тоже кипела работа. Землекопы (рабочих, которые строили каналы, дороги и железнодорожные пути, по-английски называли «navvies», от слова «navigator») увозили выкопанную землю на тачках. Каменщики стояли на деревянных планках и аккуратно укладывали кирпичи в те самые 11,5 см, которые образовались при продвижении щита вперед. Они использовали чистый римский раствор, который очень быстро застывал и

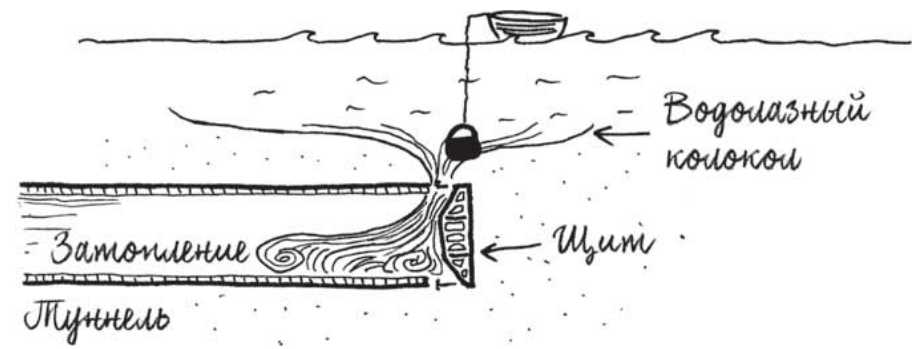
невероятно прочно держался. Раствор был настолько прочным, что, когда Брюнель проверял его, слепив блок из кирпичей и сбросив его с высоты, тот даже не треснул. Брюнель заставил рабочих постучать по кирпичному блоку молотками и стамесками – кирпичи трескались, а раствор оставался на месте. Тогда Брюнель решил использовать этот раствор для строительства туннеля, несмотря на его высокую стоимость (вспомним, что для производства чистого цементного порошка требуется очень много энергии и стоимость можно снизить, добавив в него заполнитель).

Я пытаюсь представить, каково было работать в этом туннеле. Прежде чем мне позволят пройти на строительную площадку, мне нужно сдать экзамены, пройти инструктаж по первой помощи и правилам безопасности, а также надеть защитную одежду. Я хожу по площадке и выполняю свою работу, не волнуясь о том, что я могу не вернуться с нее живой. Условия работы в том викторианском туннеле были совершенно другие: из-за сильного запаха пота, плотного дыма и газообразных испарений дышать там было очень трудно – рабочие часто выходили из туннеля с почерневшими ноздрями. Иногда из почвы внезапно высвобождались воспламеняющиеся газы, и, если рядом с ними случайно оказывались лампы, газы загорались и взрывались. Воздух был влажный, и перепад температур доходил до 30°, причем иногда за несколько часов. Еще там было невероятно шумно: кричали каменщики, лязгали железные тросы, стучали доски, а в туннеле эхом отдавался стук кованых сапог. Сам Брюнель стал страдать от переутомления, и ему выписали единственное работающее лечение: кровопускание с помощью пиявок на лбу.

Сын Брюнеля Изамбард, которому тогда было едва за двадцать, стал незаменимым работником этого проекта и его главным инженером. (Софию, старшую дочь Брюнеля, промышленник лорд Армстронг прозвал Брюнелем в юбке, потому что отец вопреки устоявшемуся укладу обучил дочь инженерному делу. Когда Изамбард и София были детьми, девочка проявляла больше способностей в математике и технике – и инженерии, но ей не повезло, ведь она родилась во времена, когда у женщин не было таких карьерных возможностей. Она могла бы стать великим инженером.) А Изамбард, как и отец, часто болел. И все становилось только хуже: по мере продвижения почва неожиданно оказалась худшего качества, а средства на строительство были на исходе. В какой-то момент строительство туннеля прекратили, а сам его заложили кирпичом вместе со щитом. Еще шесть лет Брюнели пытались убедить

казначейство инвестировать в проект дополнительные средства. Директора компании вмешивались в работу Брюнеля, отказывались приобретать оборудование, которое он требовал использовать для обеспечения безопасности, и оказывали на него давление, заставляя работать быстрее, несмотря на риски. Но хуже всего была проблема затопления. Та самая «хорошая» глина, на которую надеялся Марк, местами была неплотной, а иногда и вообще пропадала, особенно когда рабочие оказались прямо под рекой.

Темза, по сути, служила огромной канализацией: все отходы Лондона (да и трупы) оказывались в реке. Почва на дне реки была очень сырой и ужасного качества, а туннель проходил всего в паре метров под рекой. По мере продвижения щита вперед почва часто смещалась сильнее, чем должна была. Между щитом и кирпичным туннелем было слабое место, и, если почва оказывалась особенно плохой, она попросту обрушивалась, а вода лилась прямо в проход.




Затопление туннеля и использование водолазного колокола для заделывания бреши

Когда это случилось в первый раз, Изамбард решил проблему, обратившись в Ост-Индскую компанию и позаимствовав у них водолазный колокол (камеру, в которой помещалась пара человек и которую можно было погружать под воду). В нем он погрузился на дно реки, нашел протечку и заложил прореху железными прутьями, а поверх них поместил мешки с глиной. Как только воду откачали, можно было копать дальше.

Но это было лишь первое из четырех крупных затоплений, в которых погибло много людей. Изамбарду и самому едва удалось спастись при затоплении, и в результате у него случилось первое (и не последнее) серьезное кровоизлияние, из-за чего ему пришлось покинуть стройку на несколько месяцев, чтобы поправить здоровье.

Несмотря на все неудачи, в 1843 году, после 19 лет работы,

туннель был готов. Пешеходы, с которых взимали плату за проход, спускались по винтовой лестнице в туннель, который после отделки выглядел просто восхитительно. Ряд колонн посередине поддерживал огромные кирпичные арки. Газовые лампы освещали проход, а на итальянском органе, работающем на паровом двигателе, исполнялась музыка. В небольших нишах в кирпичных стенах лоточники продавали закуски и сувениры. В 1852 году в туннеле прошла первая ярмарка, на которой были артисты, пожиратели огня, индийские танцовщики и китайские певцы.

Но всего через десять лет, когда железные дороги стали частью повседневной жизни, туннель потерял былую славу. Люди уже не хотели ходить пешком и вместо этого катались на новеньких скорых поездах. Туннель стал мрачным и заброшенным, а собирались в нем одни пьяницы. В 1865 году он был передан Восточнолондонской железнодорожной компании, к 1869 году в нем проложили рельсы, и по нему стали ездить урчащие паровые поезда. Сегодня по нему проходит наземная линия лондонской железной дороги. Шахту Ротерхита, которую Марк Брюнель так изобретательно выкопал, недавно открыли для туристов, и она стала популярной достопримечательностью. Войдите в приземистую круглую башню – и окажетесь в подземной пещере, где можно увидеть остатки винтовой лестницы и пятнистые и потертые стены с загадочными черными трубами, которые входят и выходят из стен. Это невероятно атмосферная площадка для концертов и театральных представлений, которые здесь проходят.

Если учесть, что строительство туннеля под Темзой заняло около 20 лет, а уже через 20 лет он оказался заброшенным, вряд ли его можно назвать успешным проектом. Зато благодаря инженерному воображению Марка Брюнеля мы получили доступ к подземельям своих городов. Лондонское метро – первое подземное метро в мире – построено благодаря работе Марка и Изамбарда Брюнелей, которые показали нам, как строить в текучей почве.

Когда рабочие выкапывали туннели линии Кроссрейл (новой железнодорожной линии в Лондоне), они использовали современную версию первого неудачного изобретения Брюнеля. Брюнель не смог получить достаточную мощность для вращения гигантских лезвий, а нам легко удалось это сделать с помощью электричества. Вместо ручного труда мы используем туннелепроходческие машины, которые устроены очень интересно.

Каждая из этих машин, использующихся в строительстве

линии Кроссрейл и напоминающих огромные подземные заводы на колесах, имеет длину, равную 14 лондонским автобусам. Впереди у нее большой круговой резак, который пожирает землю перед собой. Хитрый подъемный механизм продвигает машину вперед. Конвейерные ленты транспортируют выкопанную землю в конец машины и вывозят из туннеля. Лазерная система наведения обеспечивает движение в верном направлении. За туннелепроходческой машиной следует целый комплекс устройств, которые выкладывают стены бетонными кольцами (иногда используется сталь).

По одной милой традиции при прокладке туннелей этим машинам дают женские имена и только потом начинают работу. При строительстве Кроссрейл даже устраивали конкурс на лучшую пару имен для машин, потому что они работают по две, прокладывая туннель сразу в двух направлениях из одной точки. Одну пару назвали в честь королев великой железнодорожной эпохи – Виктория и Елизавета. Еще одна пара носит имена олимпийских спортсменок – Джессика и Элли. Еще одна названа в честь женщин, которые написали первую компьютерную программу и нарисовали любимую горожанами карту «Лондон *от А до Я*», – Ада и Филлис. Пожалуй, наиболее уместная пара имен – Мэри и София – в честь жен великих строителей туннеля Изамбарда и Марка Брюнелей.

# Глава 10. Чистота

Мне очень радостно видеть, как туристы фотографируют здания города, потому что это означает, что им нравится инженерия, даже если они этого не осознают. Амбиции и воображение архитекторов вызывают у них восхищение и отзываются в них – изогнутые навесы, высокие силуэты и уникальные фасады проходят тщательный отбор, а затем попадают в кадр и застывают во времени, служа драматическим фоном бесчисленных фотографий, сделанных на смартфоны на селфи-палках. Эта архитектурная драма является романтической частью инженерии, и ее не стоит недооценивать. Тем не менее в конечном счете инженерия отвечает сугубо практическим соображениям. Часто она связана с чуть более скучными предметами, вроде почвы, материалов и законов, которым она следует. Здание или мост могут выглядеть эффектно, но на самом деле то, из чего они состоят, может быть решительно неэстетично само по себе.

Больше всего на облик будущего здания влияет вода, которая настолько важна для человека, что мы не можем прожить без нее больше трех дней. Постройки, которые я проектирую, подобны скелетам: пока в них нет воды, они напоминают необитаемые ракушки. Вместе с другими инженерами (по механике, электрике, общественному здравоохранению) мы предусматриваем полноценное функционирование этого скелета: мы проводим в нем пути и делаем так, чтобы фундамент, несущие стены и перекрытия выдержали вес насосов и труб. Только когда заработают эти артерии, здание будет пригодно для жизни.

Несмотря на то что наша планета называется «голубой планетой» из-за огромного количества воды на ней, мерцающие соленые морские воды, покрывающие большую часть поверхности Земли, непригодны для питья. Нам, людям, для выживания нужен доступный источник пресной воды. Но вот проблема: на самом деле у нас этих источников не так много. Если всю воду нашей планеты представить на площади размером с футбольное поле, то пресные озера на ней будут занимать место размером с диванную подушку, а реки на поверхности земли займут площадь не больше моего чайного блюдца.

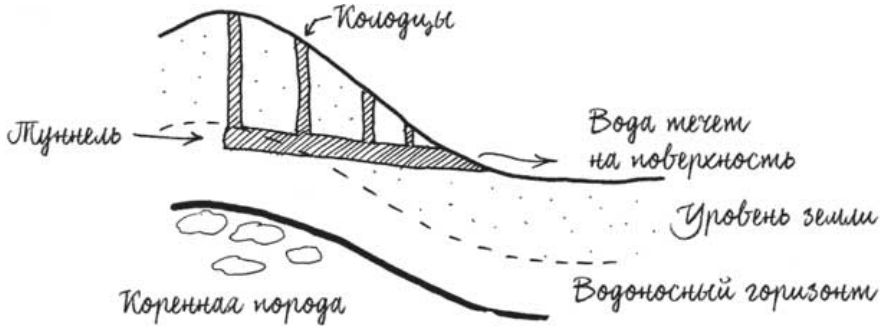
Искать воду довольно трудно – и вот почему многие наши древние поселения основаны на берегах рек, – но из поселений выросли большие города, поля сельскохозяйственных культур стали занимать много места, а мы стали расселяться все дальше и дальше от источников воды, и *подача* воды стала проблемой.

Неудивительно, что в древние времена люди довольно изобретательно решали проблему поиска и транспортировки пресной воды. Даже сегодня инженеры усердно трудятся над поиском решений для этого технически сложного процесса, и в некоторых регионах мира это по-прежнему непреодолимое препятствие.

Как и многие другие народы в те времена, древние персы с трудом находили пресную воду. В центре Ирана располагается большое засушливое плато, куда выпадает совсем мало дождя – меньше 300 мм в год. Когда пролетаешь над страной, под тобой простирается пустыня, лишенная цвета безжалостно палящим солнцем. Но иногда рядом с небольшими деревушками и городками или даже на необитаемых участках пустыни можно заметить дыры в песке. С высоты птичьего полета они похожи на маленькие крабьи норки, которыми испещрен пляж в Мумбаи, где я выросла. (Когда я была маленькая, я сидела и бесконечно смотрела на эти норки, ожидая и надеясь, что в них покажутся крабы.) Только эти отверстия выстроены ровными рядами и гораздо крупнее. К счастью, это не дело клешней какого-нибудь гигантского краба – их вырыли люди за последние 2700 лет. И все это время они необходимы для выживания местных жителей.

Эти отверстия являются частью *кариза,* как его называют на персидском языке (или *каната,* на арабском): системы, которую древние персы использовали для того, чтобы достать свою жизненную силу – воду – из-под земли.

Чтобы понять, как их строили, давайте перенесемся в пустыню на две с половиной тысячи лет назад. *Муканни,* или рабочий, ищет у холма или склона признаки присутствия воды – например, подземные слои почвы, которые вынесло на поверхность, или изменение типа растительности. В том месте, где может быть вода, он лопатой выкапывает цилиндрический колодец чуть больше полуметра в диаметре. С помощью лебедки, к которой крепится кожаное ведро, он вытаскивает выкопанную землю на поверхность. Он долго работает под палящим солнцем, надеясь нащупать влажную почву – признак того, что близко могут проходить грунтовые воды. Иногда он выкапывает колодец максимальной глубины, на какую способны его инструменты, но так ничего и не находит. Иногда оказывается, что вода прячется очень глубоко, более чем в 200 м под поверхностью земли. Время от времени нужно закопаться всего на 20 м, чтобы найти живительную влагу. Это хороший день.



Оригинальный кариз

Но работа *муканни* только началась: возможно, он нашел совсем немного воды и скоро она закончится. Ему необходимо убедиться, что он открыл настоящий источник. Поэтому он оставляет в своем новом колодце ведро и в течение следующих нескольких дней проверяет, сколько в нем собирается за ночь воды. Если он просыпается и видит полное ведро, значит, он нашел золотую жилу – или нечто еще более ценное: он раскопал *водоносный горизонт* (подземный пласт проницаемых пород, содержащий воду). Тогда они с коллегой *муканни* выкапывают колодцы, в ряд друг за другом, по направлению вниз со склона холма.

Измеряя глубину с помощью отвеса, *муканни* выкапывают каждый колодец чуть глубже предыдущего. Целый ряд колодцев может показаться странным, но вот в чем заключается секрет *муканни:* у них в деревне 20 тысяч человек, а подниматься на холм, набирать воду и потом нести ее обратно довольно тяжело. Конечно, так делают много где по всему миру, но здесь рельеф местности – холмы и тип почвы – помогает *муканни* значительно облегчить людям жизнь.

Когда колодцы готовы, рабочие начинают копать горизонтальный туннель от основания одного колодца к основанию другого, и получается водопровод около метра шириной и полутора метров высотой – места как раз достаточно, чтобы они могли перейти от одного колодца к следующему.

Этот туннель имеет небольшой наклон, и, соединяя дно колодцев, он выводит воду из-под горы. Наклон туннеля очень важен: если он будет слишком велик, то сильное течение размоет землю и туннель обрушится. Если наклон будет слишком мал, то вода будет застаиваться.

*Муканни* зажигают масляную лампу и ставят ее в начало туннеля. По мере продвижения внутрь горы они ориентируются на пламя, чтобы линия получилась прямой. Из-под земли могут подниматься ядовитые газы, от которых можно задохнуться, так

что лампа служит им не только маячком, но и предупредительным сигналом: если пламя ровное и яркое, значит, кислорода достаточно. Если оно горит разными цветами или гаснет, значит, здесь есть и другие газы. Рабочих подстерегают и другие опасности. Из-за рыхлой почвы туннель может обрушиться, поэтому там, где нужно, *муканни* устанавливают в туннели обручи из обожженной глины. Обручи действуют как пара арок, соединенных вместе: вес рыхлой почвы давит на обручи, и они находятся под действием силы сжатия. Глина хорошо сопротивляется сжатию, поэтому обручи усиливают туннель и защищают его от обрушения.

Последнюю опасность таит в себе головной колодец (самый первый колодец, основание которого выходит к водоносному горизонту). Рабочим приходится прокапывать туннель к этому колодцу очень осторожно, иначе поток воды может прорваться в туннель, и они погибнут.

Способность обходить все эти опасности зависит от опыта *муканни,* который передается у них из поколения в поколение: методы постройки *кариза* не сильно изменились с древних времен.

Длина таких водопроводов разная: от 1 км до целых 40 км. Некоторые из них служат постоянным источником воды, а другие – сезонным. Для поддержания системы *муканни* пользуются дополнительными колодцами. Часто в туннеле накапливается ил и мусор, который достают с помощью ведра и лебедки. Если их регулярно ремонтировать, то они прослужат очень долго.

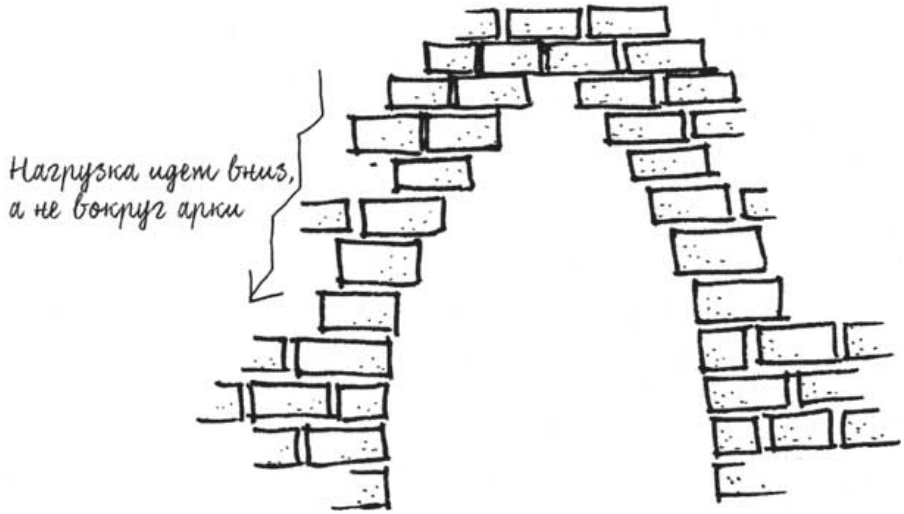
Говорят, в Иране насчитывается более 35 тысяч *каризов* – сетей из сотен тысяч подземных ходов, построенных вручную и по-прежнему обеспечивающих жителей водой. В городе Гонабад находится старейший и величайший кариз. Ему 2700 лет, а длина его канала насчитывает 45 км, и он обеспечивает водой 40 тысяч человек. Глубина главного колодца больше, чем высота «Осколка».

Выкапывать глубокие колодцы до водоносного горизонта – только один из способов обеспечить жителей водой. В мире есть разные источники, везде разный рельеф земной поверхности, а у разных цивилизаций и эпох свои инструменты, так что люди придумали множество решений, и некоторые из них мы используем и сегодня. К концу VIII века до н. э. два канала, снабжающие водой Ниневию, столицу Ассирии, перестали удовлетворять нужды растущего населения. Царь Синнахериб (который правил между 705–681 гг. н. э.) уже воспользовался своими инженерными навыками, чтобы затопить и уничтожить Вавилон. Теперь ему предстояло найти дополнительный источник

воды и привести его в Ниневию. Он начал работу почти в 50 км от города, на водоразделе реки Атруш. Отсюда он провел канал к верховьям реки Тебиту, чтобы увеличить количество воды в Тебиту. До этого на реке построили запруду с резервуаром, откуда в Ниневию поступала большая часть воды. Теперь этот дополнительный поток направится в город по двум каналам, и воды в городе станет больше.

Но здесь была одна проблема. Чтобы из реки вода попала в каналы, ведущие в Ниневию, ей нужно было пересечь по трубопроводу небольшую долину, а без насоса поднять воду вверх по склону не было никакой возможности. Синнахериба это не смутило, и он разработал систему, которая перенесет воду через долину, – сейчас такая система известна как *акведук.* Мы считаем римлян главными инженерами по части акведуков, но ассирийский царь опередил их на несколько сотен лет, и его акведук сейчас является одной из старейших подобных систем в мире. Его остатки по-прежнему можно увидеть в Джерване на севере Ирака.

Технически слово «акведук» обозначает любой искусственный канал для транспортировки воды из одного места в другое: это может быть канал, мост, туннель, сифон (водонапорная труба) или любое сочетание этих систем. Мост-акведук в Ниневии был величайшей постройкой Синнахериба, мастера-строителя, который создал многие памятники гражданской архитектуры в Ниневии, в том числе «Дворец, не имеющий себе равных». Возможно, он также приложил руку к висячим садам Семирамиды. На строительство акведука пошло более двух миллионов каменных кубов, по полметра шириной. Постройка получилась 27 м в длину и 15 м в ширину и состояла из стрельчатых *ступенчатых* арок (арок изогнутой формы, которые поддерживают выступающие камни) выше 9 м. По каналу на вершине моста вода проходила по долине. Канал был отделан слоем бетона, чтобы вода не просачивалась сквозь него.




Ступенчатая арка

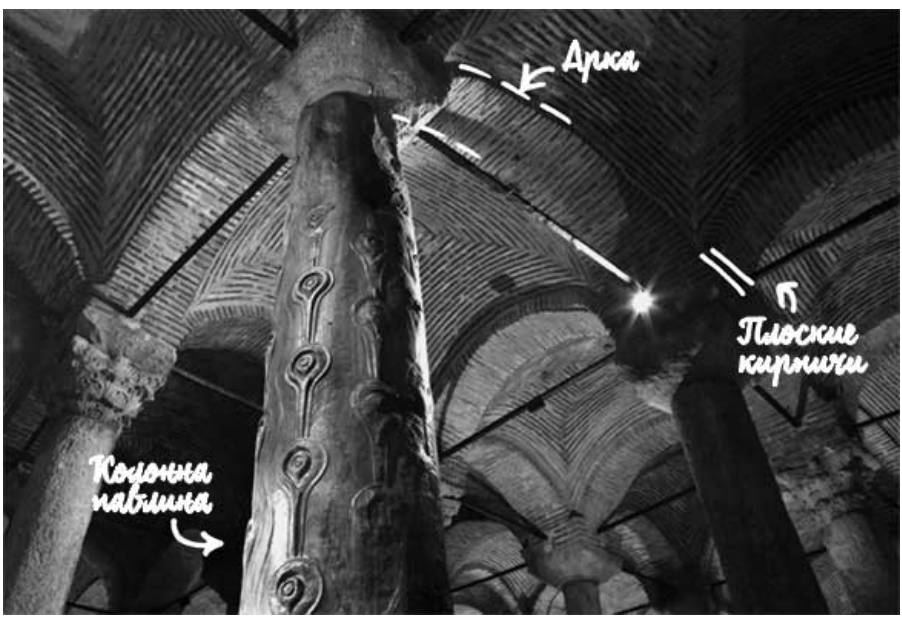
Невероятно, но новый канал с акведуком построили всего за 16 месяцев в 690 году до н. э. Когда постройка была почти готова, Синнахериб отправил к верхнему концу канала двоих священников для совершения религиозных обрядов. Но еще до назначенного для церемонии времени ворота, сдерживающие поток воды, неожиданно открылись, и река хлынула в канал. Инженеры и священники опасались реакции короля, так как природа нарушила его пожелания. Но король решил, что это благое предзнаменование, ведь самим богам не терпелось посмотреть на его великолепную работу, поэтому они и разрушили ворота. Он отправился к началу канала, чтобы осмотреть повреждения, починил поломку, а инженеров и рабочих наградил цветными тканями, золотыми кольцами и кинжалами.

Поиск и транспортировка воды – две большие задачи инженеров. Как только у тебя это получится, нужно знать, что с этой водой делать: третья, не менее важная задача – где-то хранить готовую к употреблению воду. Римляне, которые достигли высочайшего мастерства в сооружении акведуков, нашли не менее смелое решение задачи хранения воды: например, Цистерна Базилика, которая находится в центре – или скорее под центром – Стамбула в Турции.

Римляне не изобрели цистерну: уже в четвертом тысячелетии до нашей эры люди в регионе Леванта (современной Сирии, Иордании, Израиля и Ливана) возводили сооружения для хранения воды. Цистерны на первый взгляд имеют простое устройство, но на самом деле самые крупные из них можно считать чудесами инженерного дела.

У Цистерны Базилики, например, огромные стены – толщиной до 4 м, которые выдерживают давление многих кубометров воды. Чтобы вода не вытекала, римляне тщательно замазывали стены слоем известковой штукатурки толщиной 10–20 мм. Поскольку потолок цистерны – городская площадь, постройка должна быть достаточно крепкой, чтобы выдержать вес зданий, дорог и пешеходов.

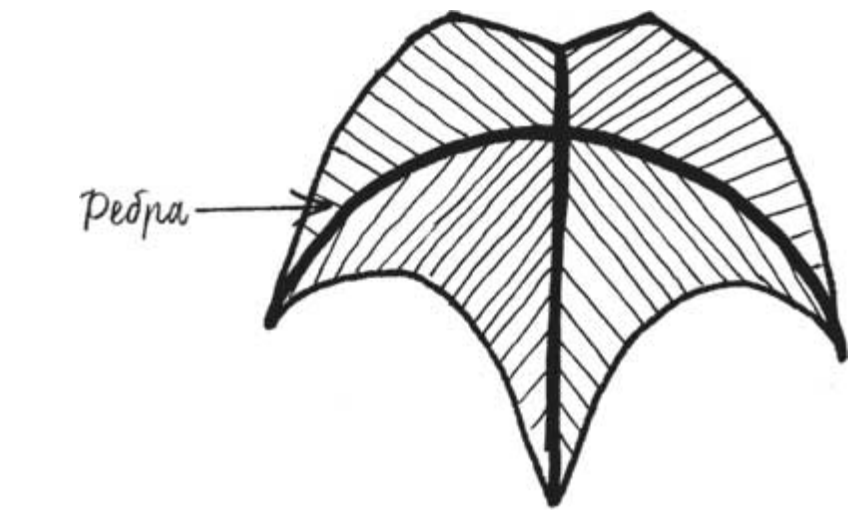
Когда я ездила в Стамбул, солнце поднимало температуру до 35°С, в городе было душно, и я была очень рада спуститься под землю по старой каменной лестнице и вдохнуть прохладный воздух большого зала. Светильники придавали помещению оранжево-красный цвет, а на фоне из невидимых динамиков играла успокаивающая музыка. Я ступила на деревянный помост, который построили недавно для туристов. Внизу был мелкий прудик с кристально-чистой водой, в котором тихо плавали серые призрачные карпы. Я долго стояла, наблюдая за ними, пока меня не пробудили из этого умиротворения капли воды, которые падали мне на голову и на руки.



Цистерна Базилика, Стамбул

Я посмотрела наверх и увидела потолок из красного римского кирпича – того самого, плоского – с толстыми слоями раствора. Между бесчисленных колонн протянулись большие арки. Между этими арками располагались четырехсторонние своды (купола, которые делятся на квадранты четырьмя ребрами). Всю эту впечатляющую постройку поддерживали 12 рядов по 28

мраморных колонн высотой 9 м, которые образовывали стройный узор. Вершины колонн были разные – какие-то с классическими греческими и римскими украшениями, другие были ровные и простые – их взяли из храмов и других разрушенных зданий. Некоторые колонны за долгое время раскололись, и их соединили черными железными кольцами. На паре колонн у основания была изображена голова греческой горгоны Медузы, а вокруг ее лица вместо прядей грозно вились змеи. По легенде, один ее взгляд мгновенно превращал людей в камень, но здесь одна из двух ее голов располагалась вверх тормашками – видимо, таким образом смертоносная сила ее взгляда не действовала. На одной колонне, известной под названием «Колонна слез», вырезан любопытный узор из кругов и линий: они представляют собой глаза птиц, наполненные слезами, и, очевидно, колонна выполнена в честь сотен рабов, погибших при строительстве цистерны.




Четырехсторонний свод

Цистерну Базилику построил император Юстиниан в 532 году Она расположена под Стоя Базилика, большой городской площадью на первом холме города, который тогда назывался Константинополем (в честь императора Константина, который в 324 году сделал город столицей Римской империи). В цистерне помещалось столько воды, сколько в 32 олимпийских бассейнах. Вода попадала в цистерну по акведуку, идущему от природных источников неподалеку от Мраморного моря. Она обслуживала Большой дворец, где жили римские императоры, а затем они уехали, и про цистерну забыли. В 1545 году ученый по имени Пьер Жиль общался с местными жителями, когда исследовал византийские древности. После недолгих уговоров он узнал их

тайну: они опускают ведра в отверстия в полу своих подвалов и чудесным образом достают оттуда свежую чистую воду. Иногда у них в ведре оказывалась живая рыба. Они и понятия не имели, почему и как это происходит, – просто радовались, что у них есть источник чистой воды (и иногда даже еды), и, пока не явился Жиль, это так и оставалось тайной. Жиль сообразил, что их дома построены над одной из знаменитых римских цистерн, стал исследовать местность и нашел ее.

Я, например, рада, что он ее нашел – у этого места своя особая магия, захватившая воображение многих людей, в том числе тысяч туристов, которые побывали там после реконструкции и открытия в 1987 году. И, конечно, режиссера фильма *«Из России с любовью»,* который снял, как Джеймс Бонд и Керим Бей укрываются здесь среди колонн в своих строгих серых костюмах перед тем, как отправиться шпионить за российским посольством.

Невероятно, как о чем-то столь огромном и впечатляющем, как Цистерна Базилика, можно было просто забыть. Невероятно, как бесцеремонно римляне обращались с водой. Многие историки считают, что дождевой воды им было достаточно для жизни и что акведуки строили только для терм и фонтанов. Довольно странно, что столь грандиозные инженерные сооружения служили только для роскоши и наслаждений, особенно это странно потому, что во многих регионах мира и сейчас, и тогда вода была в дефиците и на ее добычу уходила вся инженерная изобретательность.

В 2015 году я ездила в Сингапур к подруге и жила у нее в квартире на 14-м этаже в башне с чудесным видом на город. Я спросила, безопасна ли вода из-под крана для питья (конечно, безопасна) и есть ли горячая вода, чтобы я приняла душ после долгого перелета. Она предупредила, чтобы я не расходовала много воды, выключила душ, пока буду намыливаться, и убедилась, что из крана не капает, когда буду уходить.

Меня очень впечатлили ее старания беречь воду и природу, но после душа и более подробного разговора я поняла, в чем дело. С самого раннего возраста ее родители, учителя и коллеги внушали ей, что вода – ценный ресурс, который нельзя тратить понапрасну. Дело в том, что в Сингапуре нет природных водоносных горизонтов и озер. Есть несколько рек, на которых построили запруды с водохранилищами, а других природных источников воды просто нет. На протяжении всей истории страны, как в качестве британской колонии, так и независимого государства, обеспечение жителей водой представляло проблему.

Первыми источниками воды в Сингапуре служили ручьи и

колодцы, которых хватало, пока население не превышало тысячи человек. Но после 1819 года, когда сэр Стэмфорд Раффлз присоединил страну к Британской империи, это число значительно увеличилось. В 1860 году на острове жило уже 80 тысяч человек, и правители стали строить водохранилища с запасами воды. В 1927 году они заключили соглашение с соседней Малайзией на аренду земли в Джохоре, откуда они провели трубы с неочищенной водой из реки Джохор. По взаимной договоренности они провели вторую трубу из Сингапура в Джохор, по которой поступала уже очищенная вода. Во время Сингапурской обороны, когда остров захватили японцы (в 1942 году), трубы были разрушены, и у людей осталось воды на пару недель. «Пока у нас есть вода, мы будем сражаться», – объявил генерал-лейтенант Артур Персиваль, – но 16 февраля он был вынужден сдаться.

Это тяжелое испытание надолго осталось в сознании людей, даже после ухода японцев, которых потом снова сменили британцы, – до 1963 года, когда страна ненадолго стала частью Малайзийской федерации. Поэтому, когда Сингапур обрел полную независимость 9 августа 1965 года, обеспечение страны независимым источником воды стало одной из приоритетных задач правительства.

В 1961 и 1962 годах Малайзия подписала соглашения с Сингапуром об обеспечении его водой. Срок одного из соглашений истек в 2011 году, а срок второго закончится в 2061 году. Сингапурцы находятся в уязвимом положении, особенно в современном мире высокого потребления, когда воды не хватает, и, полагаю, их независимость для них очень важна, учитывая, насколько они зависят от соседей в этом основополагающем ресурсе. К примеру, если во всем регионе наступит засуха, то Сингапур может полностью оказаться во власти другой страны. Так что вода является одним из главных интересов Сингапура, как медицина или шпионы у других государств.

В результате Сингапур занимается поиском инженерных решений своей непростой ситуации. Совет по коммунальным услугам разработал стратегию под названием «Четыре государственных крана». Имеются в виду четыре источника воды, которые они будут использовать максимально эффективно, чтобы обеспечить достаточные запасы воды для всей страны.

Первый государственный кран – это дождевая вода. В Сингапуре ежегодно выпадает достаточно много осадков. Чтобы эффективно их использовать, инженеры создали специальные водосборные сооружения: бассейны, в которых дождевая вода собирается вместо того, чтобы попадать в море. Для сбора

дождевой воды построили сеть каналов и водоемов, по которым она попадает в ручьи с запрудами и водохранилища. Для этого пришлось провести массовую очистку, потому что со временем многие ручьи загрязнились отходами жилых домов и предприятий. Совет по коммунальным услугам вынудил загрязняющие предприятия переехать и создал юридическую базу для защиты водохранилищ от загрязнения. Дождевую воду теперь собирают и сохраняют на двух третях территории острова. В нескольких ручьях по-прежнему установлены запруды – в основном в тех, что находятся ближе к морю и вода в которых немного соленая (без специальной очистки ей нельзя было бы пользоваться). Как только инженеры закончат свою работу, для этих целей будет использоваться уже 90 % территории, и Сингапур станет единственной страной в мире, которая собирает и сохраняет практически всю свою дождевую воду.

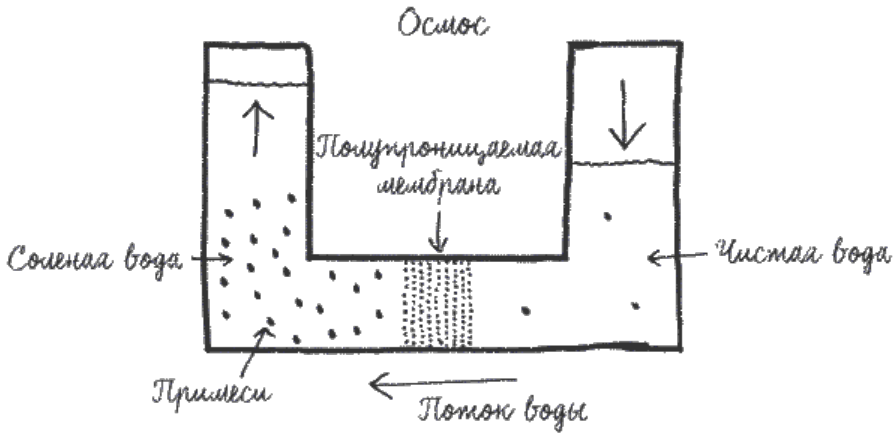
Второй государственный кран – это вода из Малайзии, которую Сингапур продолжит импортировать до истечения срока соглашения. Третий кран – это переработанная вода. Практика утилизации сточных вод не нова – в Лос-Анджелесе и других частях Калифорнии так делают с 1930-х годов, – но она по-прежнему не повсеместна.

В Сингапуре впервые задумались об утилизации сточных вод в 1970-е, когда нужные технологии еще были слишком дорогими и относительно ненадежными. Но со временем они улучшились до той степени, что проект оказался жизнеспособным, так что теперь сточные воды собирают из жилых домов, ресторанов и предприятий, и они проходят трехступенчатую очистку с использованием новейших мембранных технологий.

Первый этап – *микрофильтрация,* при которой вода проходит сквозь полупроницаемую мембрану. Ее обычно изготавливают из синтетических органических полимеров вроде поливинилиденфторида, и через нее определенные молекулы и атомы проходят, а другие нет, а также не проходят другие частицы, бактерии, вирусы и простейшие. По сути, мембрана представляет собой микроскопический дуршлаг, который пропускает жидкость и задерживает твердые вещества. В воде, проходящей через мембрану, все равно остаются растворенные соли и органические молекулы, поэтому их убирают на второй стадии очистки, которая называется *обратным осмосом.*

Осмос – это движение растворителя (вещества, которое растворяет другие вещества, – например, воды) из менее концентрированного раствора в более концентрированный, пока концентрации не сравняются. Этот процесс является частью нашего природного мира. Как раз с помощью него корни

растений поглощают воду из почвы, а еще наши почки поглощают минералы, например, мочевину, из крови. Увидеть этот процесс в действии можно самостоятельно: нужно взять яйцо, уксус и патоку или кукурузный сироп. Сначала яйцо нужно замочить в уксусе на пару дней, чтобы кальций в скорлупе растворился и осталась, по сути, осмотическая мембрана. Затем яйцо нужно положить в патоку или кукурузное масло.

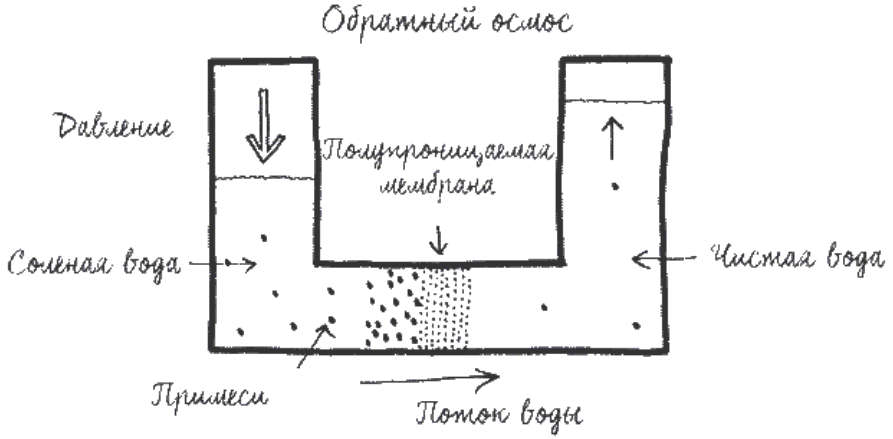



Процесс осмоса

За несколько часов на поверхности яйца появятся морщинки, потому что вода начнет уходить сквозь мембрану, а яйцо таким образом обезвоживаться. Если взять сморщенное яйцо и положить в пресную воду, то пойдет обратный процесс: яйцо начнет впитывать воду сквозь мембрану.

Осмос происходит естественно: пресная вода легко проходит через фильтр и смешивается с соленой водой. Но если нужно произвести больше пресной воды, то к соленой воде нужно применить давление, потому что мембрана блокирует соль, бактерии и другие растворенные вещества. Давление, которое нужно применить, должно быть больше естественного осмотического давления, чтобы пресная вода прошла сквозь полупроницаемую мембрану. Так происходит обратный осмос.

Обратный осмос позволяет удалить 99 % растворенных солей и других загрязнений. В результате этого процесса уже получается вода высокого качества, но в ней по-прежнему могут присутствовать бактерии и простейшие. Поэтому воду на всякий случай дезинфицируют ультрафиолетовым светом, убивая таким образом оставшиеся микроорганизмы, и теперь ее можно использовать.




Процесс обратного осмоса

В 2003 году, после нескольких лет испытаний, общественности представили «Новую воду» – переработанную. На параде в честь 37-го Национального дня Сингапура премьер-министр Го Чок Тонг, первый премьер-министр Сингапура Ли Куан Ю и еще тысячи людей открыли по бутылке «Новой воды» и сделали глоток прямо на камеру. Никто не заболел. На самом деле, «Новую воду» используют в основном на промышленных и производственных предприятиях, где требуется вода еще лучшего качества, чем питьевая. «Новая вода» прошла более 100 тысяч тестов и даже превосходит требования Всемирной организации здравоохранения к воде, пригодной для потребления, – даже если от ее происхождения вам становится не по себе.

И, наконец, четвертый государственный кран – морская вода. В 2005 году Сингапур открыл первый завод по опреснению воды в Туасе, где морскую воду вначале фильтруют, чтобы удалить крупные примеси, а затем несколько раз пропускают через фильтры обратного осмоса, почти как «Новую воду». В результате получается чистая вода, в которую затем добавляют минералы, нужные нам для здоровья, а потом она попадает в дома и на заводы. Завод в Туасе производит 130 000 м$^3$ воды в день. Из третьего и четвертого государственных кранов Сингапур уже получает более 50 % нужной воды. Предполагается, что к 2060 году этот показатель вырастет до 85 %, – и это будут эффектные и жизненно важные преобразования, ставшие возможными благодаря грамотному планированию и инженерии.

Тот факт, что Сингапур собирает большую часть всей своей дождевой воды для повторного использования и планирует долгосрочные проекты по сохранению воды, показывает, как инженерия решает важные жизненные задачи. Задача добычи воды – основного и незаменимого для жизни вещества – стара как

мир, а сейчас мы можем решить ее с помощью самых передовых технологий. Время идет, население в мире растет, а вместе с ним растет и спрос на воду, так что инженерам и ученым всего мира придется придумать новые способы хранения этой бесценной жидкости, построить новые каналы и призвать науку на помощь при ее очистке.

Или мы просто не выживем.

# Глава 11. Порядок

Поездка в Японию в 2007 году стала для меня одним из самых запоминающихся и вдохновляющих путешествий. Мы с мамой бродили по улицам Токио и дивились торговым автоматам, в которых продавались яйца, фрукты, лапша и даже щенки, а ели мы в суши-ресторанах, где повара готовили с энтузиазмом, а официанты выкрикивали заказы гармоничным хором.

Меня заинтриговали даже туалеты, где играла музыка и горели разноцветные кнопочки, а чистящие аэрозоли автоматически дезинфицировали воздух, превращая такой прозаический акт в настоящее захватывающее действо. В попытке поэкспериментировать я все-таки нажала пару кнопок, о чем сразу же пожалела – зато почувствовала себя гораздо чище, несмотря на некоторое нарушение личных границ. Когда мы уехали из Токио в провинцию, то увидели там гораздо более приземленные туалеты, которые очень контрастировали с токийскими, – хотя им, конечно, все равно не сравниться со средневековой Японией.

Задолго до установления в стране режима сегуната Токугава (1603–1868) твердые отходы человеческой жизнедеятельности, которые иносказательно называли «ночной землей», шли на продажу. Их грузили на корабли, и те плавали по всей Японии, продавая их. Неудивительно, что от этих кораблей доносился сильный прогорклый запах, и люди жаловались, когда эти зловонные суда швартовались рядом с кораблями, везущими чай. Однако магистраты решили, что эта торговля имеет жизненно важное значение и людям придется мириться с запахом.

Торговля человеческими фекалиями была важна из-за особых проблем, с которыми сталкивалось маленькое островное государство. У Японии было очень мало земли для выращивания сельскохозяйственных культур, а население стремительно росло и требовало увеличения производства продуктов питания. Так что земли, пригодные для посевов, приходилось интенсивно использовать, чтобы получать достаточно продовольствия, собирая больше одного урожая в год. Из-за этого природные питательные вещества в почве стали стремительно истощаться. Традиционно японцы удобряли почву отходами жизнедеятельности животных, но на острове животных было немного, поэтому жителям пришлось искать другое решение. Ответ они нашли в своих собственных отходах: из-за быстрого роста населения их становилось все больше. Так что сегуны

Токугава решили превратить нужду в добродетель и стали собирать отходы на корабли, а потом продавать фермерам, которые хотели увеличить свой урожай.

Торговля дерьмом скоро превратилась в крупный бизнес. В первые годы правления сегуната Токугава страна стала зависеть от удобрений, поступающих из Осаки, одного из крупнейших городов того времени. В город прибывали корабли, загруженные овощами и фруктами, и обменивали свой товар на «ночную землю» его жителей. Стоимость «ночной земли» быстро возросла (очевидно, инфляция влияет и на фекалии), и овощей уже не хватало, чтобы расплатиться за столь ценный товар: к началу XVIII века за него стали платить серебром. Вступил в силу закон, по которому права на фекалии, производимые жильцами дома, принадлежали владельцу дома, зато права на мочу щедро даровали самим жильцам. Стоимость фекалий, которые 20 семей производили в год, равнялась стоимости зерна, которое один человек съедает за год. «Ночная земля» стала неотъемлемой частью рынка недвижимости: чем больше у хозяина дома было жильцов, тем больше отходов он мог собрать и тем дешевле была аренда жилья.

В итоге фермеры, сельские жители и городские гильдии стали бороться за право на покупку «ночной земли». К середине XVIII века законодатели Осаки присвоили исключительные права официально признанным гильдиям и ассоциациям, которые устанавливали справедливую цену. Даже тогда высокие цены ударили по наиболее бедным фермерам, а за кражу люди рисковали получить серьезный тюремный срок.

Сбор «ночной земли» мог стать причиной конфликта, но у него были и неожиданные преимущества. Так как отходы собирали очень тщательно и осторожно, источники питьевой воды гораздо меньше загрязнялись. На пользу шли и другие культурные традиции: в основном японцы потребляли воду, заваривая чай, а при кипячении погибали многие болезнетворные микробы. А те, кто следовал ритуальным практикам синтоизма, имели твердые взгляды на источники нечистот – кровь, смерть, болезнь – и «очищались», если им приходилось контактировать с чем-то нечистым. Благодаря всему этому в Японии с середины XVII до середины XIX века был высокий уровень чистоты и гигиены, в отличие от многих западных стран, и в результате смертность в Японии была ниже.

В XX веке все изменилось. Население постоянно росло, а из-за разорения во время Второй мировой войны (и не только экономического) уровень жизни людей сильно ухудшился. В 1985 году всего у трети населенных пунктов были современные

канализационные системы – этот недостаток был вызван главным образом новыми методами обращения с отходами, предшествовавшими современным. В 1980-х годах канализационную сеть модернизировали, и сегодня японцы славятся своими продвинутыми туалетами, резко контрастирующими с торговлей «ночной землей», процветавшей здесь давным-давно.

Как в современном мире, так и в далеком прошлом, то, как город справляется с отходами, – показатель его успешности и развития предпринимательства. Почти в каждом доме в городах Хараппа и Мохенджо-Даро в Индской цивилизации (около 2600 г. до н. э.) был водопровод и туалет со сливом. В наших густонаселенных пост-индустриальных городах эффективная утилизация отходов всегда имела важное значение. Как утверждала Флоренс Найтингейл (чьи инициативы в области гигиены произвели революцию в больницах и домах Викторианской эпохи) в отчете о санитарных условиях в Индии в 1870 году: «Истинный ключ к санитарному прогрессу в городах кроется в водоснабжении и канализации». Те из нас, кому повезло жить в месте с хорошей канализацией, едва ли задумываются о том, куда деваются какашки, когда мы нажимаем кнопку слива. А те, кому повезло не так сильно, слишком хорошо знакомы с болезнями и смертями, которые вызывает гниение отходов. Возможно, от этой темы большинству людей становится дурно, но при стремительном росте населения планеты все важнее становится разработка соответствующих канализационных систем.

«Проблема в том, – сказал Карл, – что всем насрать на какашки». И ушел.

В то время я работала над проектом небольшого многоквартирного дома рядом с Оксфорд-стрит в центре Лондона. Пока я занималась проектированием автостоянки с колоннами и бассейна в подвале, мой друг Карл, инженер по канализации, рассчитывал, сколько жидких отходов будет поступать из душевых кабин, раковин и туалетов в здании и из осадков на улице. После того как он подсчитал количество жидкости в час, ему нужно было обеспечить достаточное количество труб, чтобы эти отходы поступали в лондонскую канализацию. Из исторических записей мы знали, что к нашему зданию примыкала смежная канализация, но не понимали, насколько она большая и как сильно заполнена, и находится ли она в приемлемом состоянии. Мы хотели узнать, можем ли мы использовать ее для слива отходов из нашего здания, а также не повредим ли мы ее, когда будем раскапывать подвал. Карл

написал в исследовательскую компанию запрос на эту информацию, чтобы закончить свой проект.

В один прекрасный день Карл пришел в офис с DVD и безо всяких объяснений попросил меня включить его на компьютере. Почти сразу я вскрикнула и поспешила выключить эту штуку. Прямо посреди офиса, где находились мои коллеги, на мониторе моего компьютера, который вдруг показался мне огромным, показывали результаты исследования канализации. Я нажала на «стоп» и сообщила Карлу, что не могу это смотреть, – как раз тогда он произнес ту фразу и ушел.

Я собралась с духом, села, глубоко вдохнула и нажала «плей». Фильм был снят на маленькую камеру, установленную на роботе на колесах, который ехал по канализации на беспроводном управлении, а управлял им человек снаружи. Кирпичные стены были темно-красного цвета и выглядели довольно чисто, несмотря на неаппетитное содержание, которое текло по ним последние 150 лет. Канализация была удивительно большая – по ней можно было бы идти в полный рост – и имела форму неправильного овала, напоминающего яйцо, стоящее на остром кончике. Благодаря такой форме поток течет легко – когда жидкости мало, скорость потока высокая, потому что жидкость течет в самой узкой части канализационной трубы. Когда жидкости много, у нее больше пространства за счет широких стен.

Изумление и любопытство, которые я испытала при виде робота, движущегося по настоящему произведению инженерного искусства, пересилили тошноту при виде того, что лежало на дне. На следующей неделе мы с Карлом (быстро забыв о своем фекальном инциденте) изучили видео в подробностях и решили, что ближайшая канализация исправна и в хорошем состоянии, так что отходы из нового здания можно сливать туда. (Нельзя было просто взять и сливать их, как нам удобно, из-за риска переполнения канализации. Поэтому во многих зданиях в Лондоне мы создали «резервуар ослабления» в подвале, где отходы накапливаются и поступают в канализацию в приемлемом объеме.) Для меня это был очень волнительный момент: я создавала настоящую физическую связь с новаторской инженерной работой Джозефа Базалгетта столетней давности, который построил обширную канализационную сеть под столицей. В то время Лондону была крайне необходима такая система, потому что жизнь в Лондоне в начале XIX века была отвратительна.

Первоначально равнину, где находится Лондон, обеспечивали водой и рыбой многочисленные притоки Темзы. Но вместе со

значительным ростом населения города в середине XIII века качество воды ухудшилось. Со временем все становилось только хуже, так как притоки превратились в открытые канализации, где плавали трупы животных и даже людей. К XV веку «водоносы» зарабатывали себе на жизнь, принося воду из колодцев в коромысле на плечах, но реки находились в таком жутком состоянии, что даже вверх по течению вода была не лучше. Вода, которую пили жители Лондона, была загрязнена их собственными отходами и трупами.

Кроме того, в городе было 200 тысяч выгребных ям – цилиндрических ям, часто выложенных изнутри кирпичом в попытке сделать их водонепроницаемыми, около метра в диаметре и двух метров глубиной, с закрытым основанием и крышкой сверху. Они использовались для хранения отходов жизнедеятельности: люди сливали в них содержимое своих ночных горшков. Работой ночных сторожей, или ассенизаторов (*англ.* gong-farmers, от слова «gong», которое в Средневековье, очевидно, означало «отхожее место»), состояла в том, чтобы периодически выгребать из них отходы и уносить их в ведрах в поля. Это решение лучше, чем когда отходы текут по улицам, но тоже решительно негигиенично, учитывая, что поля находились не так уж далеко от центра Лондона. Очистка ям была не только неприятной работой, но еще и опасной: вспомните историю ночного сторожа Ричарда, который в 1326 году упал в выгребную яму и задохнулся в гниющей жиже из мочи и фекалий.

Попытки уполномоченного по делам канализации добиться от парламента строительства новых канализаций в 1840-х годах ни к чему не привели. Изобретение туалетов (современного типа, со сливом) только усугубило ситуацию: негерметичные выгребные ямы еле справлялись с концентрированными отходами, а теперь в них сливали много лишней воды, из-за чего они затапливались. В 1850 году в попытке решить эту проблему власти запретили выгребные ямы, но в результате канализации (предназначенные только для сбора дождевой воды) совершенно переполнились. Все отходы – и человеческие, и все остальные – оказались в Темзе, воду из которой люди по-прежнему брали для мытья, готовки и питья.

Мерзкая смесь воды с отходами приводила к серьезным смертоносным эпидемиям холеры. Они обычно ударяли в конце лета и осенью и забирали жизни половины зараженных людей. В 1831–1832 годах от холеры погибло более 6 тысяч человек.

Затем были еще две крупные вспышки болезни, в 1848–1849 (более 14 тысяч погибших) и 1853–1854 годах (еще 10 тысяч летальных исходов). В то время господствовало убеждение, что

холера витает в воздухе, а заражаются ей, вдыхая ядовитую «миазму». Но во время вспышки заболевания в 1854 году доктор Джон Сноу (1813–1858) изучал состояние здоровья людей, которые брали воду из загрязненного источника в Сохо, и собрал доказательства, что это не так: холера распространяется в загрязненной питьевой воде.

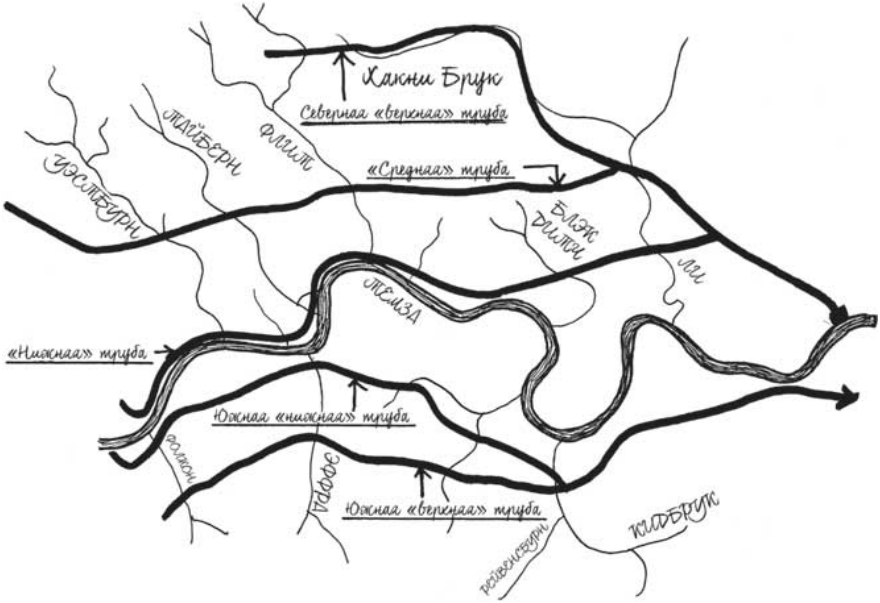
Тот факт, что лондонские отходы убивают столицу, стал особенно очевиден необычайно жарким летом 1858 года, когда запрещенные, но по-прежнему гниющие выгребные ямы нагрелись и засорили Темзу и ее притоки, из-за чего город стал еще зловоннее, чем обычно. И так началась «Великая вонь», как ее называли. Вонь стала настолько невыносима, что люди вымачивали занавески в хлорной извести, чтобы хоть как-то ее перебить. Министры в Палате общин и адвокаты в Линкольнз Инн не смогли работать, и им пришлось уехать из города.

Единственным положительным моментом в этом всем было то, что чиновники, на которых теперь лично сказались эти ужасные условия, все-таки решили избавиться от зловония и холеры. В 1859 году, спустя много лет отказов инженерам, которые пытались решить проблему лондонской канализации, власти наконец-то одобрили работы Джозефа Базалгетта.

Базалгетта описывали как человека с безразличным темпераментом, но приятной и добродушной улыбкой. Он был значительно ниже среднего роста, но благодаря своему длинному носу, зорким серым глазам и черным бровям производил впечатление сильного человека. Он родился в Энфилде на окраине Лондона в 1819 году и сделал карьеру инженера-строителя. Урезание налогов, связанное с быстрым развитием железных дорог, привело к нервному срыву в 1847 году, после чего Джозеф стал инспектором Комиссии по делам канализации, которой было поручено решить проблему канализации в Лондоне. Затем его назначили в Совет рабочих, который должен был найти решение проблемы утилизации лондонских отходов.

Гротескная сатирическая гравюра Томаса Маклина 1828 года о водоснабжении города под названием «Суп из чудовищ, также известный как вода из Темзы»

Базалгетт разработал план с использованием старых притоков Темзы, которые превратились в канализацию и которые до этого направили в кирпичные водоводы и каналы. Эти водоотводы помогали удовлетворить спрос на строительство домов: реки ограничили узкими каналами, и люди смогли строить дома близко к воде. Часто эти каналы оказывались под дорогами, благодаря чему места было еще больше. Притоки начинались далеко от реки и текли с севера на юг, а потом впадали в Темзу (которая текла с запада на восток) и несли в нее свои гнилые воды.




Основная канализационная сеть Базалгетта под Лондоном

Джозеф Базалгетт решил перехватить эти водоводы и их жуткое содержимое. Он осуществил эту задачу в нескольких точках и создал новую канализационную сеть, расположив ее под старыми водоводами. В старых водоводах, чтобы частично перекрыть поток воды, он построил перегородки высотой до середины. Затем перед этими перегородками он вырыл дыры в дне, чтобы большая часть отходов попала в его новую канализацию. Растопырьте пальцы на левой руке, а потом подставьте под нее правую руку, чтобы пальцы шли под прямым углом, и так вы получите представление о системе Базалгетта. Левая рука представляет собой ряд старых притоков, текущих по водоводам, а правая – ряд новых канализационных труб Базалгетта.

К северу от реки Базалгетт установил трубы под водоводами в трех местах. Первая была далеко на севере, где водоводы проходили относительно высоко (для тех, кто знаком с Лондоном, эта ветка идет из Аппер-Холлоуэя через Стэмфорд-Хилл и Хакни вниз, в сторону Стратфорда). Примерно на полпути от этой «верхней» трубы к реке он установил «среднюю» трубу, которая идет из Бейсуотера, проходит под Оксфорд-стрит, ныне известным торговым районом, и Олд-стрит. Эта труба собирала и другие сточные воды, которые попадали в сливы и выливались туда через отверстия на дне каждого водовода. И, наконец, у самой реки он установил «нижнюю» трубу, в которой собиралась оставшаяся вода. К югу от реки он тоже поступил подобным

образом, но там установил только верхнюю трубу (она идет из Бэлхэма через Клэпхем и Нью-Кросс в Вулвич) и нижнюю (эта проходит из Вандсворта через Баттерси, Уолворт и попадает в Нью-Кросс). Так сделали потому, что в этом районе жило меньше людей, и город к югу от реки протянулся на меньшее расстояние, чем к северу. В сумме эта канализационная система насчитывала 160 км.

Набережные Виктории, Альберта и Челси в Лондоне – плоды его трудов. В них проходят нижние трубы вдоль Темзы. Еще до Базалгетта инженеры ограничили ширину притоков Темзы, поместив их в водоводы, а Базалгетт сузил саму могучую реку этими набережными. В его подземных ходах поместилась не только канализация, но и первый метрополитен.

При проектировании пяти основных канализационных труб и еще сотен вспомогательных, для расчета необходимых размеров Базалгетт с лихвой увеличил потенциальный объем отходов, которые ежегодно производит каждый из двух миллионов жителей города. А потом, подумав, что эти сооружения строятся раз и навсегда, удвоил их еще. Верхней точкой его труб было их начало на западе, а затем они шли на восток под наклоном чуть менее 40 см на каждый километр, где они приходили к двум новым насосным станциям. Эти станции спроектировали Базалгетт и архитектор Чарльз Генри Драйвер. Первая называется Кросснесс (она обслуживала две южных трубы), а вторая – Эбби Миллс (она обслуживала три северных трубы). Эти насосные станции – прочные, внушительные и напоминающие соборы – шедевры поздней викторианской архитектуры. По-настоящему удивляет интерьер станции Кросснесс, где огромное очистное оборудование окружает блестящая латунь и богатая, ярко раскрашенная железная ковка. Кстати, эти станции часто показывали в кино – например, в фильме *«Бэтмен: Начало»* и *«Шерлок Холмс»*.

Когда отходы проходили по трубам и попадали на насосные станции, их поднимали до того уровня, чтобы они естественно утекали в резервуары далеко на востоке. На северном берегу отходы хранили в Бектоне, а на юге они попадали в резервуар неподалеку от насосной станции Кросснесс. Жидкость с помощью насосов поднимали так высоко, чтобы потом под действием гравитации она утекала в Темзу в сторону моря во время отлива. В те времена содержимое труб по-прежнему сливалось в реку без очистки.

Базалгетту велели сделать так, чтобы резервуары находились как можно дальше на востоке, чтобы в худшем случае, если они наполнятся и их *придется* опустошать во время прилива, отходы

не дошли на запад до Вестминстера – министры не желали снова ощутить запахи, которые им пришлось терпеть в 1858 году. Оказалось, что, сузив реку набережными, Базалгетт невольно заставил ее разливаться гораздо дальше во время прилива, так что время от времени запахи все равно возвращались.

Интерьер викторианской насосной станции с декоративной ковкой. Очистные сооружения Кросснесс, Эрит, Лондон

Несмотря на всю простоту идеи, лежащей в основе канализационной системы Базалгетта, воплотить ее было отнюдь не просто, так как для строительства новой канализации пришлось раскопать лондонские улицы. Должно быть, это была невероятно неудобная и сложная работа, ведь нужно было выкопать землю на нужную глубину, затем построить кирпичные канализационные трубы в форме яйца, соединить их с водоводами, а потом еще заделать ямы и вернуть улицы на место.

Но это того стоило, потому что жизнь в столице потихоньку начала улучшаться.

Качество воды в центре Лондона резко повысилось. Канализацию Базалгетта (общей протяженностью 2100 км, а ушло на нее 300 миллионов кирпичей) наконец достроили в 1875 году. К тому времени лондонские эпидемии холеры ушли в прошлое, в основном благодаря практичному, эффективному и масштабному инженерному проекту Базалгетта.

Базалгетт брал сточные воды из центра Лондона и сливал их в Темзу за городом, откуда они попадали в море. Отходы не очищали, поэтому система попросту уводила болезнетворные элементы из населенного района в необитаемый. Если сегодня это звучит как устаревший метод, то вы, наверное, удивитесь, узнав, что мы по-прежнему пользуемся этой системой.

В современных канализационных системах дождевая вода попадает в трубы, отдельные от тех, где собираются отходы жилых домов и офисов, а также промышленные отходы заводов и ресторанов. Смысл в том, что дождевую воду, в которой нет загрязнений, можно сливать в моря и реки, а сточные воды, в том числе промышленные, попадают в очистные сооружения.

В этих сооружениях загрязненные отходы расщепляют на базовые химические вещества с помощью серии физических, химических и биологических процессов. «Физические» подразумевают фильтрацию: вода проходит через мембраны и очищается от примесей.

При «химической» очистке в отходы добавляют химические вещества, которые вступают с ними в реакции и расщепляют их. «Биологические» процессы похожи на химические, только для расщепления отходов в них помещают особые бактерии. В результате получаются «очищенные сточные воды», то есть безопасные для окружающей среды, и тогда их можно утилизировать или использовать в качестве сельскохозяйственных удобрений.

По крайней мере, в теории. На практике так получается редко. Поразительно, что, по оценкам агентства ООН, которое занимается исследованием населенных пунктов, 90 % сточных вод в мире попадает в окружающую среду неочищенными либо после первичной очистки. И в данный момент Лондон не является исключением. Дело в том, что в канализацию Базалгетта попадает все: и дождь, и сточные воды из жилых районов, и промышленные отходы. Проект Базалгетта значительно опередил свое время, ведь канализация вмещает отходы населения в 4 миллиона человек (что в два раза больше населения Лондона Викторианской эпохи) и дождевую воду. Сейчас население

Лондона составляет 8 миллионов человек, а мы по-прежнему пользуемся этой системой, которой, к слову, почти 150 лет. Пока она в основном исправно работает, потому что трубы достаточно велики и пропускают 1,25 миллиарда килограммов какашек в год. Но так как сейчас система работает почти на полную мощность, то она не может вместить еще и дождь, поэтому, если выпадет хотя бы 2 мм осадков в день (а это частенько случается в старом добром сыром Лондоне), то канализация переполнится.

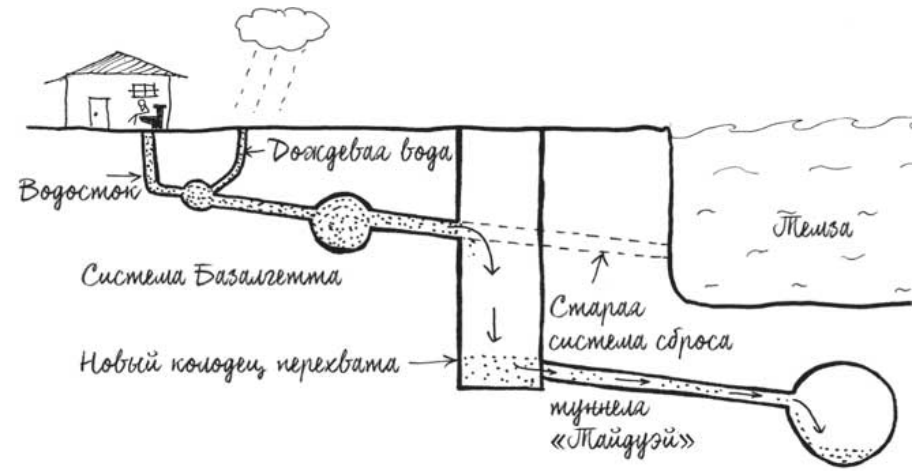
Вдоль Темзы проходит 57 труб, по которым излишки сливаются прямо в реку. Выход одной такой трубы можно увидеть в Баттерси, где к реке выходит огромная усиленная железная дверь. Еще один есть под мостом Воксхолл. Только через одну эту трубу в реку сливается 280 тысяч тонн отходов в год. Некоторые из этих выходов построены еще при Базалгетте, а остальные появились позднее. В 2014 году избыток сточных вод приходилось сливать в реку чаще чем раз в неделю, и таким образом в год в Темзу попадало до 62 миллионов тонн неочищенных отходов. Это примерно столько же, сколько 8500 синих китов, которые *каждую неделю* ныряют в реку. Если мы ничего не предпримем, к 2020 году этот показатель удвоится. Подобные статистические данные кому угодно не дадут дышать спокойно. К счастью, к 2023 году должен быть реализован масштабный проект для решения этой проблемы, прямо под ногами у ничего не подозревающих лондонцев – туннель «Тайдуэй».

Я договорилась о встрече с Филом, одним из руководителей проекта по созданию нового «кишечника» столицы. Мы сели в большой столовой и стали говорить о моче и фекалиях – или, точнее, о том, как от них теперь будут избавляться более современным способом.

«Наша схема расширяет проект Базалгетта, – пояснил Фил. – Думаю, он сам бы так поступил, если бы в его время население Лондона выросло до таких масштабов». Исходные данные проекта просты: 150 лет назад Базалгетт перехватил притоки реки. А новый туннель перехватит трубы Базалгетта – вместо того чтобы при переполнении канализации выливаться в реку, отходы будут попадать в новую сеть туннелей.

Масштабы проекта впечатляют. На 21 участке по всему городу – в том числе в зоне слива в Уоксхолле – построят вертикальные колодцы до 60 м глубиной, в которых будут собираться излишки сточных вод. Большинство из них построят на берегу реки. Первым делом соорудят огромную *перемычку* – водонепроницаемый корпус, в котором будет идти строительство. Новый колодец установят как раз рядом с местом слива сточных

вод. Затем построят камеры, по которым из существующей канализации сточные воды будут попадать в этот колодец. Так что вместо реки сточные воды будут отправляться по этим камерам в резервуар. Фил отметил, что построить новую систему – это хорошо, но еще невероятно важно сделать ее незаметной как для глаз, так и для носа (я прямо представила, каково это – жить рядом с огромным туалетом). На крышах этих резервуаров разобьют парки. Так что всего через несколько лет вы будете сидеть на лавочке у реки, попивая капучино, и любоваться травой и деревьями, не подозревая о том, что прямо под вами по канализации Базалгетта проплывают тонны сточных вод в секунду. Когда отходы окажутся на дне колодца, они пойдут по трубе в новый туннель.




Перехват сточных вод по проектируемому туннелю «Тайдуэй». Будущее канализационной системы Лондона

Диаметр основной артерии составляет 7,2 м: в ней могли бы поместиться три двухэтажных автобуса в ряд. Она начинается в Актоне в западной части Лондона и ниспадает на 1 м каждые 790 м по пути на восток. К тому времени, когда воды попадают на насосную станцию Эбби Миллс, туннель достигает высоты 20-этажного здания. Из Эбби Миллс сточные воды перекачиваются на очистные сооружения в Бектоне.

Большая часть этого туннеля проходит под самой Темзой в центре Лондона, и это поистине интересная инженерная стратегия. И отличная идея, потому что строить новую инфраструктуру под оживленными дорогами даже в лучшее время трудно. Зато у Лондона большая сеть подземных туннелей и тысячи зданий с глубоким фундаментом. Если пустить туннель под водой, то он пройдет всего под 1300 зданиями (кажется, что

это много, пока не посчитаешь, что их было бы гораздо больше, если бы туннель проходил под землей). Еще он пройдет под 75 мостами и 43 другими туннелями, в том числе метро, так как расположится глубоко под городом.

Сама земля представляет еще одну большую проблему. Поскольку проектируемый туннель проходит под городом под наклоном с запада на восток, то в разных местах он встречается с совершенно разной почвой. В начале в Актоне он проходит через глину, которая то расширяется, то сжимается. Средняя секция туннеля в центре Лондона проходит через разные смеси песка и гравия, в которых вообще трудно прокладывать туннели, потому что они движутся и не образуют твердой структуры. И, наконец, восточная его часть в Тауэр-Хамлетс окажется в меловом слое с крупными залежами кремня. Невозможно предсказать, где окажется весь этот кремень, и, так как в нем трудно копать, могут возникнуть задержки, потому что туннелепроходческие машины будут очень медленно прокладывать путь. Туннель должен быть хорошо укреплен, особенно в тех местах, где соединяются разные виды почвы, потому что один тип грунта может быть более сухим и твердым, чем другой, и тогда на соседние участки туннеля будут воздействовать разные силы при сжатии и растяжении почвы. В разных частях города одновременно будут работать пять таких машин и двигаться в разных направлениях, чтобы образовать туннели, которые потом объединятся в большую «суперканализацию».

Задача этого невероятного проекта в том, чтобы сократить число сбросов отходов в реку в год с 60 до 4, а количество сточных вод сократить с 62 миллионов тонн до 2,4 миллиона тонн в год. Я спросила Фила, почему нельзя полностью решить проблему отходов, и он объяснил, что эти четыре сброса будут происходить только во время проливных дождей: когда идут такие грозы, сточные воды сильно разбавляет дождь, поэтому сброс в реку не токсичен. Эти разбавленные сточные воды не повлияют на уровень кислорода в реке благодаря естественным биологическим процессам в экосистеме реки. Чтобы снизить число сбросов сточных вод до нуля, туннель «Тайдуэй» должен был бы быть еще в два раза больше.

Инженерам часто приходится идти на такие компромиссы: идеальное решение не всегда является самым практичным. При идеальных условиях мы бы построили отдельные канализации для дождевой воды и для отходов, но тогда бы нам пришлось перекрыть весь Лондон и перекопать все улицы, чтобы поместить под них новую сеть. При еще более идеальных условиях мы бы вообще не сбрасывали отходы в Темзу, но это может даже

негативно сказаться на окружающей среде. Если бы мы построили туннель в два раза большего размера, то нам пришлось бы выкопать в два раза больше земли, а это значит, что строительство займет гораздо больше времени и для него потребуется больше машин и энергии. Таким образом еще сильнее сократилось бы количество воды в самой реке, так как естественные притоки оказались бы полностью перекрыты.

Проект туннеля «Тайдуэй» однозначно скажется на качестве воды в реке: пловцам и гребцам больше не придется разгребать отходы человеческой жизнедеятельности. Еще больше меня обрадовал Фил, когда рассказал, что проект включает новые очистные сооружения. Мы прошли полный цикл от решения Базалгетта, а теперь добавляем к его системе новую сеть колодцев и туннелей для удовлетворения нужд современного города. На этот раз мы будем очищать отходы, чтобы не загрязнять моря.

Сегодня мы отдаем дань уважения Базалгетту за его мастерство и воображение, позволившие ему создать канализационную систему, которой мы пользуемся и 150 лет спустя. Надеюсь, новая расширенная система прослужит нам еще столько же, и спустя сто лет жители города будут благодарить нас за то, что мы подарили Лондону новый «кишечник».

Пожалуй, достаточно говорить о какашках.

# Глава 12. Кумир

Когда я прихожу в зал для совещаний, обычно я оказываюсь там единственной женщиной. Иногда я даже веду подсчет: 11 мужчин и одна я, 17 мужчин и одна я. Думаю, больше всего было соотношение 21 мужчины и одной меня. Я веду дела в окружении мужчин, и меня поражает, когда кто-то из них матерится, потом смотрит виновато и извиняется лично передо мной (они просто не слышали меня за рулем). Я открываю бесчисленное количество рабочих писем, адресованных «господину Агравалу» – в конце концов, по моему имени не определить пол, и с 90-процентной вероятностью окажешься прав, если выберешь мужской. Все это потому, что, к моему разочарованию, в своей профессии я в меньшинстве.

Работать в мире мужчин сложно во всех отношениях, иногда это весело, а иногда невыносимо. Трудно сохранять невозмутимость и вести серьезные профессиональные разговоры о моделировании по методу конечных элементов и прочности грунта, когда оказываешься в офисе на стройплощадке в окружении плакатов с голыми женщинами. Как-то раз строитель спросил, хочу ли я сфотографироваться в «костюме», то есть в каске и флуоресцентном жилете, которые я постоянно надеваю на стройплощадку. Я слышала рассказы других женщин в этой области о том, как их (незаконно) спрашивали на собеседовании о том, когда они планируют выходить замуж и рожать детей.

Хорошо, что в основном это единичные случаи. И, в конце концов, я люблю свою работу и верю, что любой может преуспеть в этом деле при достаточном упорстве и стойкости. Признаюсь, быть в меньшинстве иногда даже хорошо – люди запоминают меня после деловой встречи, потому что я со знанием дела рассуждала о бетоне и подъемных кранах в шикарном платье и туфлях. А еще мне выпало несколько невероятных возможностей как представителю своей профессии в виде съемок модной одежды и макияжа.

Мой кумир в инженерии – Эмили Уоррен Роблинг

Я восхищаюсь многими инженерами – я многих из них упоминала в этой книге, – но Эмили Уоррен Роблинг занимает особое место в моем сердце. Она понимала технические концепции не хуже любого инженера-мужчины, окончившего университет, куда женщин не принимали. Она не получила официального образования, а просто научилась всему сама, когда ей это понадобилось. Блестящие коммуникативные навыки принесли ей уважение не только рабочих на стройплощадке, но и высокопоставленных политиков того времени. Более того, инновации в инженерии внедрялись под ее чутким руководством.

Быть в меньшинстве и работать в строительстве трудно даже в XXI веке, а Эмили занималась этим во времена, когда считалось, что женский мозг вообще не способен понимать сложную математику и инженерию, которые она блестяще освоила. Ее шедевр, Бруклинский мост, – по-прежнему один из культовых символов Нью-Йорка.

С самого раннего возраста Эмили было понятно, что она

невероятно умна и ей очень интересна наука. Несмотря на разницу в возрасте в 14 лет, у нее были теплые отношения со старшим братом Говернором К. Уорреном. В 16 лет он поступил в военную академию Вест-Пойнт, а затем служил в корпусе топографических инженеров и проводил исследования для строительства будущих железных дорог, а также занимался картографией района к западу от Миссисипи. Он отличился в сражениях в Гражданской войне в Америке (ему установили памятник у входа в Проспект-Парк в Бруклине). Уоррен был для Эмили настоящим героем. Когда умер их отец и он взял на себя ответственность за семью, он поощрял интерес Эмили к науке и помог ей поступить в подготовительную школу для женщин при монастыре Ордена посещения в Джорджтауне.

Там она продолжила развивать свой страстный интерес к науке, истории и географии и стала умелой наездницей. В 1864 году, во время Гражданской войны в Америке, Уоррена расквартировали очень далеко, и Эмили проделала трудный путь, чтобы повидаться с ним, а во время своего визита познакомилась с другом и сослуживцем Уоррена по имени Вашингтон Роблинг. Несмотря на свою обыкновенную сдержанность и рассудительность, она влюбилась с первого взгляда. Через полтора месяца он купил ей бриллиантовое кольцо.

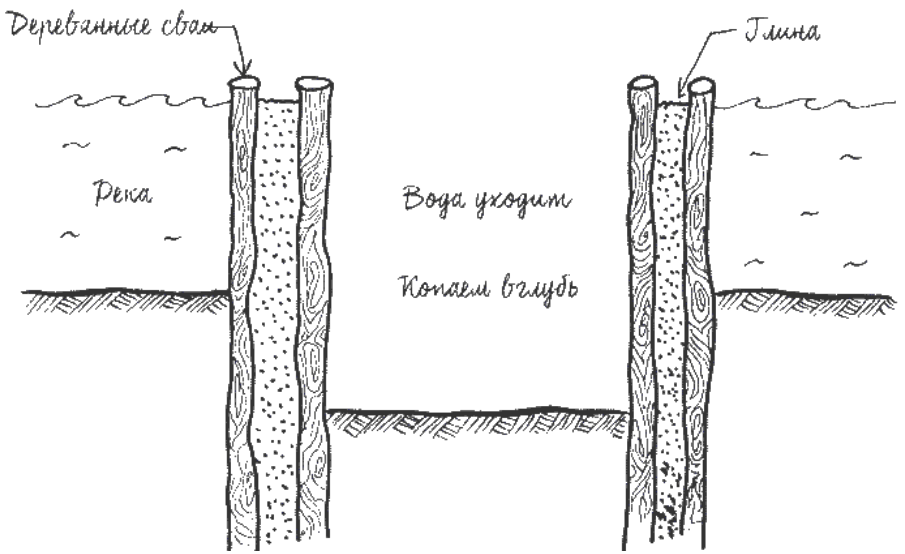
Всю войну Эмили писала ему длинные нежные письма, в полных подробностях описывая свою жизнь. Но Вашингтон уничтожал их сразу же после прочтения, объясняя это тем, что из-за писем их расставание для него еще более болезненно. Зато Эмили сохранила все, что он ей написал, и меньше чем через год у нее накопилось более ста писем со всеми его мыслями, страхами и рассуждениями. Пока он сражался на войне, она ездила к его семье и очень им понравилась. Наконец, спустя 11 месяцев переписки, Эмили и Вашингтон Роблинг поженились 18 января 1865 года, и Эмили плавно и грациозно вошла в роль типичной викторианской домохозяйки: стала заботиться о доме и семье в тени своего мужа.

Отец Вашингтона Иоганн Аугустус Роблинг, немец по происхождению, был успешным инженером, и Вашингтон планировал пойти по его стопам. В 1867 году Иоганн отправил Вашингтона в Европу изучать строительные технологии, одна из которых была взята у римлян.

Относительно легкие и маленькие постройки, которые римляне возводили в ранние годы своей империи, не требовали фундамента, потому что земля и так была для них достаточно крепкой. Когда они осваивали более сложные строительные технологии, их здания стали увеличиваться и в размере, и в весе,

и римляне поняли, что фундамент является важной частью их творений, которые без него начнут разрушаться или тонуть. Довольно легко было строить на земле, выкапывая мягкую почву и закладывая твердый камень или бетон на более прочные слои земли. А вот проделать то же самое в реке – как вы можете себе представить – было сложнее. Но римляне были изобретательны, поэтому нашли решение.

Иногда здания поддерживали деревянные сваи, которые забивали в землю. Сваи устанавливали с помощью *копра* – машины, собранной из наклонных кусков дерева, соединенных в виде пирамиды и высотой с два этажа. С помощью блоков и веревок, прикрепленных к вершине пирамиды, люди или животные поднимали тяжелые грузы. Бревно вкапывали в землю настолько глубоко, насколько это можно сделать вручную, а затем отпускали веревку с грузом, и он падал на бревно сверху, забивая его еще глубже. Процесс повторяли до тех пор, пока свая не погружалась на нужную глубину.



Римская техника строительства фундамента в воде

Чтобы построить фундамент в воде, римские инженеры вначале забивали в дно реки сваи, образующие вместе кольцо вокруг того места, где должен быть фундамент. Таким образом они строили два концентрических кольца из свай, а потом заливали пространство между ними глиной, чтобы его запечатать. Вода уходила из внутреннего кольца, и получался сухой круг, где можно было работать. Такое сооружение называется *гидротехнической перемычкой.* Этой техникой пользуются и в наше время (например, для строительства туннеля «Тайдуэй», о

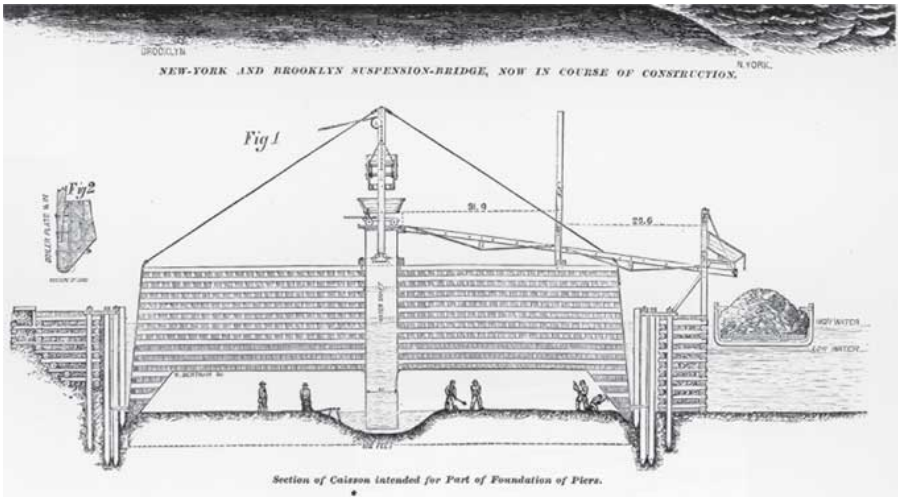
котором мы говорили в предыдущей главе), только сейчас применяют большие стальные сваи в форме круглых или трапециевидных труб.

Внутри сухой перемычки римские рабочие выкапывали ил до тех пор, пока не упирались в камень или пока перемычка не начинала протекать. На твердой почве они строили каменный или бетонный многослойный фундамент (благодаря особому пуццолановому цементу у них получалось делать твердый бетон даже во влажной и сырой среде). Как только фундамент был готов, к его основанию клали камни, которые делали его еще устойчивее, а затем ил закладывали обратно до прежнего уровня. Фундамент или основание колонны вместе с камнями оставляли в реке. Потом убирали деревянные сваи, и вода возвращалась. Рабочие строили фундамент до нужной высоты для поддержки моста.

Римские перемычки удобно было применять в тех местах, где река не очень глубокая. Но Вашингтон Роблинг хотел узнать, как строить гораздо глубже. Сваи забить не получится, потому что они должны быть слишком длинными, а из-за этого они не выстоят под напором воды. Поэтому он стал изучать современные *кессоны.*

Кессон представлял собой камеру с водонепроницаемой крышкой и открытым основанием, которую погружают на дно моря или реки. (Можно представить себе такую камеру, если погрузить перевернутый стакан в кастрюлю с водой, где на дне лежит песок. Обод стакана погружается в песок, а сам он не впускает воду.) Внутри у рабочих есть воздух, поэтому вместе с камерой они могут погружаться под воду, а с другой стороны они могут брать материалы. Но если нужно погрузиться действительно глубоко, то появляется новая проблема. Чем глубже погружаешься, тем больше давление воды и тем сильнее она давит на стенки кессона.

Для сопротивления этому давлению используется *пневматический кессон.* Он такой же, как обычный, но с дополнительной функцией: в него нагнетается сжатый воздух. Этот воздух не позволяет воде поступать внутрь и уравновешивает давление воды с обеих сторон. Шлюз дает рабочим доступ к камере. Инженеры начали пользоваться этими революционными инновациями для строительства мостов в середине XIX века, и на Вашингтона Роблинга они произвели сильное впечатление. Он даже рассматривал использование взрывчатых веществ в камере – эту технологию, по очевидным причинам, до этого не применяли.



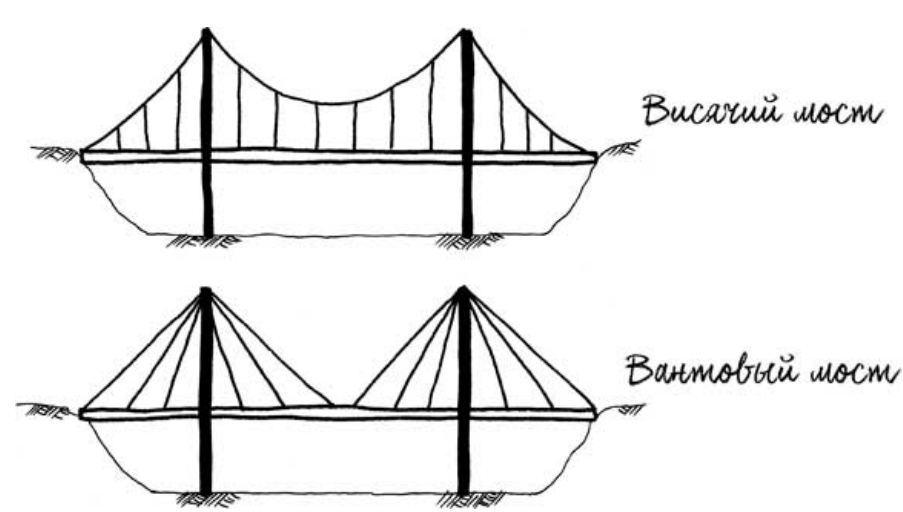

Огромный кессон, который использовали при строительстве Бруклинского моста

Эмили стала помогать мужу в его исследованиях и тоже изучала кессоны, а благодаря научным методам, которым она научилась в подготовительной школе при монастыре, она разобралась в инженерном устройстве мостов. Единственное, что она тогда плохо понимала, – это то, что работа в кессоне под огромным давлением приведет к катастрофическим изменениям в их жизни и что они с мужем уже никогда не будут прежними.

До конца XIX века между Бруклином и островом Манхэттен не было ни одного моста, и хотя по Ист-Ривер курсировали паромы, зимой, когда река замерзала, их движение останавливалось. На правительство оказывалось большое давление, чтобы они хоть как-то улучшили ситуацию. Был принят законопроект, по которому право на строительство моста передали «Нью-Йорк-Бридж-Компани», и в 1865 году Иоганна Аугустуса Роблинга назначили проектировщиком, который также должен был подготовить смету на постройку моста через Ист-Ривер. Затраты должны были поделить между собой город Нью-Йорк и город Бруклин (тогда они были отдельными городами), а также частные инвесторы. Два года спустя Иоганн Роблинг возглавил весь проект.

Центральная секция моста, который он спроектировал, имела форму висячего моста, которой чем-то напоминает вантовый пешеходный мост Нортумбрийского университета: на них обоих установлены высокие башни, к которым крепятся тросы. И на них обоих тросы постоянно натянуты, благодаря чему поддерживают полотно. Однако эти мосты отличаются тем, как в них распределяется сила, которая затем уходит в землю.

Направление сил у вантового моста прямое. Полотно растягивает тросы, а тросы, в свою очередь, сжимают башни. Однако у висячего моста вес полотна растягивает тросы, которые, в свою очередь, растягивают *еще один* трос – *параболический* – подвешенный к высоким башням с обоих концов. (*Параболы* – это кривые линии определенной формы. Для тех, кто мыслит математически: чтобы получить параболу, нужно построить график $y = x^2$.) Параболический трос крепится к фундаменту с противоположной стороны каждой башни. Он тянет башню вниз, таким образом сжимая ее и направляя силу в фундамент. Вот чем отличаются эти два вида мостов: у вантовых мостов нет параболических тросов.



Висячий мост и вантовый мост

Строительство Бруклинского моста началось в 1869 году, и почти сразу произошло несчастье. На строительной площадке случилась авария, Иоганн Роблинг заразился столбняком и умер спустя всего несколько недель, не дожив даже до закладки первого камня своего потрясающего проекта.

Вашингтон Роблинг унаследовал дело отца и стал главным инженером проекта. Для установки опор моста он использовал кессоны, которые захватили его воображение в Европе. Но его машины были больше всех, что когда-либо использовались, и он погружался гораздо глубже под воду. Положив на крышки несколько слоев тяжелого камня, он опустил в реку две огромные камеры – 50 × 30 м: одну со стороны Нью-Йорка, а вторую со стороны Бруклина.

На бумаге это выглядело разумным инженерным решением, но в реальности процесс не пошел. В первый месяц раскопок работа продвигалась так медленно, что инженеры задумались о

том, чтобы бросить и начать заново другим способом. От паровых двигателей шли клубы черного дыма, на стройке гремели бочки со смолой, инструменты и груды песка и камня, и рабочие стали сообщать о том, каково находиться в кессоне.

В ограниченном пространстве все звуки становились невероятно громкими, всюду метались тени, из-за давления у рабочих сбивался пульс и пропадал голос. Внутри камеры были покрыты склизким илом, а воздух был влажным и теплым. С землей становилось все труднее работать – постоянно встречались валуны, которые кессон не мог прорезать, – и Роблинг стал экспериментировать со взрывчаткой. Он беспокоился о качестве воздуха и о том, как его проект сказывается на рабочих, но тогда он еще не знал, что скоро угробит и свое собственное здоровье.

В течение следующих нескольких месяцев из-за многих часов работы на глубине Вашингтон страдал от истощения, временного паралича и сильной боли в суставах и мышцах. Он даже нанял врача, и врач дежурил на стройке и следил за состоянием рабочих в кессоне со стороны Бруклина, который был глубже, чем со стороны Нью-Йорка. Не до конца понимая, к каким проблемам со здоровьем ведет такая работа, Вашингтон игнорировал свои симптомы и продолжал заниматься делом. Хотя боль была временной, онемение конечностей он ощущал постоянно. Он стал жертвой *кессонной болезни,* при которой в кровь высвобождается азот и приводит к острым болям (от которых больной сгибается пополам), параличу и даже смерти. Сейчас мы, конечно, понимаем, как опасно быстро переходить из среды с высоким давлением в среду с низким – дайверы, например, поднимаются из воды со строго заданной скоростью, чтобы избежать высвобождения азота. Но в 1870 году кессоны были в новинку, и инженеры знали только то, что работать на глубине опасно, но еще не поняли, как предотвратить нанесение вреда здоровью.

Вашингтон постоянно испытывал боль – в животе, в суставах и конечностях – и страдал от сильной депрессии. У него были страшные головные боли, он терял зрение и расстраивался из-за малейшего шума. Но только у него были необходимые знания и способности для руководства проектом отца. Тем не менее физическое состояние Вашингтона помешало ему активно участвовать в строительстве – даже посильные задачи стали для него невыполнимыми. Из-за своего психического состояния он не хотел говорить ни с кем, кроме Эмили. Многие годы проектирования и планирования, которые Роблинги вложили в этот мост, как и все их личные жертвы, могли оказаться напрасными. Однако Эмили много времени проводила с мужем и

свекром в обсуждении проекта моста и даже помогала им в технических исследованиях. Постепенно она стала все больше участвовать в проекте. Это был смелый шаг. Сама мысль о том, что в проекте участвует женщина, которая даже может его возглавить, была беспрецедентна. Помимо сомнений и недоверия, которые все, вероятно, испытывали бы к Эмили, – начиная с рабочих на стройке и заканчивая инвесторами, – хватило ли ей самой уверенности и решимости стать связующим звеном между мужем и строительной площадкой, не говоря уже о том, чтобы занять место главного инженера?

У Эмили было научное образование, но она не разбиралась конкретно в строительстве мостов, так что вначале она просто передавала подробные указания от мужа. Она боялась, что он не доживет до того момента, когда мост наконец будет достроен. Потом она взяла на себя всю деловую переписку от имени мужа и регулярно писала в офисы компании. С непоколебимой сосредоточенностью она стала изучать сложную математику и материаловедение, свойства стали, анализ и установку тросов, рассчитывать цепные линии и обрела глубокое понимание технических деталей проекта. Эмили была решительно настроена завершить проект своей семьи.

Вскоре она поняла, что одних этих знаний недостаточно, чтобы успешно руководить проектом: нужно было общаться с рабочими на стройплощадке и влиятельными инвесторами. Так что она стала каждый день приходить на стройплощадку, давать указания рабочим и отвечать на их вопросы. Она контролировала строительство и передавала сообщения между мужем и другими инженерами, задействованными в проекте.

Эмили стала увереннее и все меньше опиралась на Вашингтона. В своих решениях она руководствовалась интуицией, а растущие знания и навыки помогали ей предотвращать проблемы до их появления. Она старательно вела записи обо всех работах на площадке и отвечала на письма, а также тактично представляла своего мужа на собраниях и общественных мероприятиях. Когда руководители, рабочие и подрядчики обращались к ее мужу, она общалась с ними и уверенно отвечала на их вопросы от его имени. Большинство из них оставались довольны, и многие в будущем адресовали все письма лично ей – в их представлении руководила проектом она. (В какой-то момент во время строительства велись расследования относительно добросовестности некоторых поставщиков. В 1879 году представители одного из подрядчиков, компании «Эдж-Мур-Айрон», чтобы развеять подозрения, написали письмо, адресованное миссис Вашингтон А. Роблинг, в котором даже не

упоминалось о ее муже.)

Но Эмили по-прежнему вела дела от имени Вашингтона. Ходили слухи, что на самом деле она главный инженер, который руководит строительством. Новостные агентства косвенно ссылались на нее: в *«Нью-Йорк-Стар»* лукаво говорилось об «умной леди, чей стиль и почерк уже знакомы работникам офиса Бруклинского моста». В течение всего периода строительства частная жизнь семьи Роблингов оставалась конфиденциальной: журналам и газетам не разрешалось брать у них интервью.

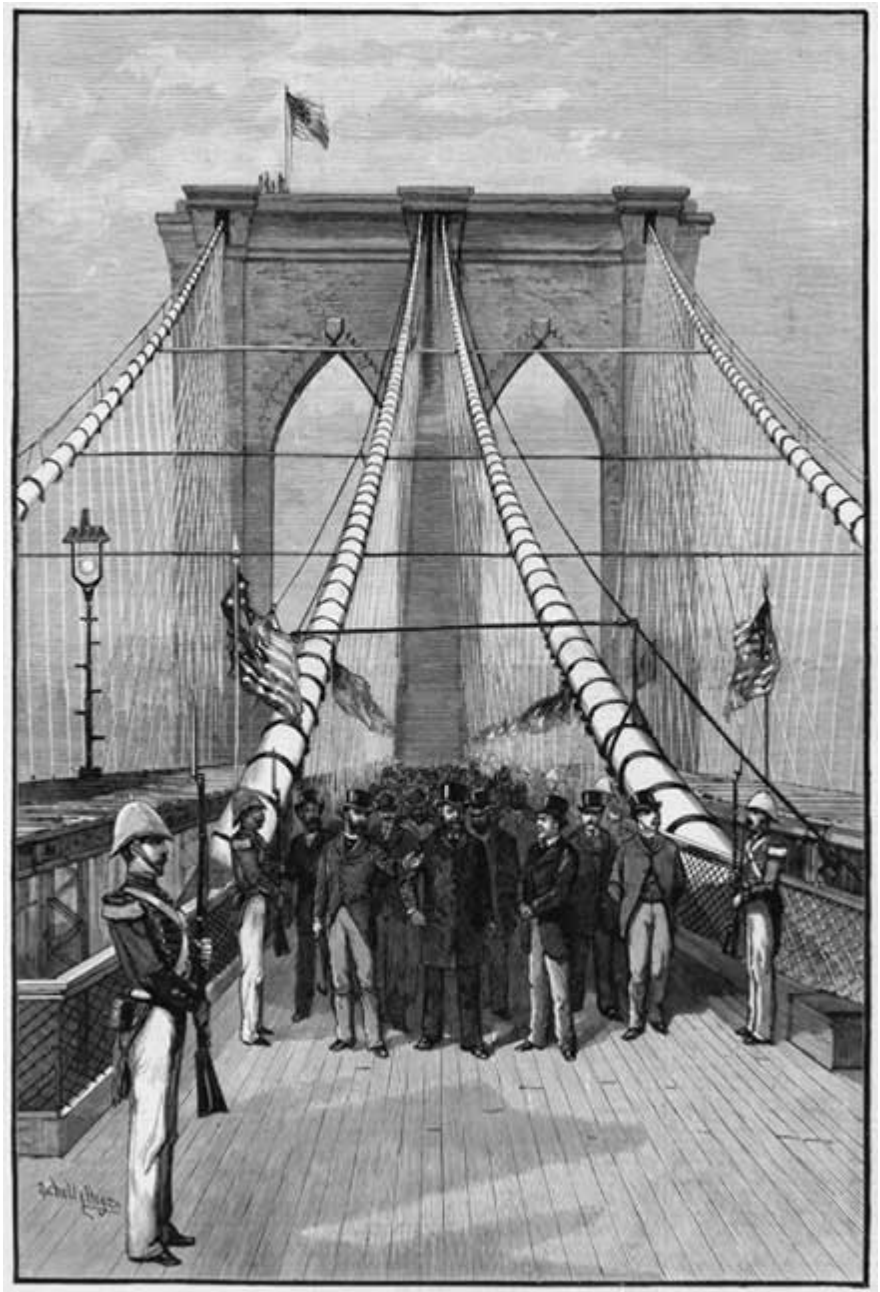
Несмотря на блестящее руководство Эмили, в строительстве стало возникать все больше проблем. Стоимость работ возросла. Двадцать мужчин погибли в несчастных случаях и от кессонной болезни. Здоровье Вашингтона никак не улучшалось. В суде шли разбирательства по так называемому «иску Миллера». Владелец склада Абрахам Миллер подал иск на города Бруклин и Нью-Йорк, потребовав убрать всю постройку. Он утверждал, что из-за моста торговля утечет в Филадельфию, ставил под сомнение способность городов финансировать проект и привлек к делу нескольких капитанов, судостроителей и инженеров, готовых дать показания о том, что стальные тросы моста небезопасны. Только благодаря решительным действиям сенатора Генри Мерфи, давнего сторонника отца Вашингтона, дело было урегулировано. Даже Роблинги не избежали обвинений – кто-то заявил, что они якобы проводили подозрительные сделки с производителями стали, и против них велось расследование на предмет взяточничества, в результате которого их оправдали. Изменился состав совета попечителей проекта, и начались политические распри между его старыми и новыми членами. А потом еще в 1879 году в Шотландии обрушился мост через реку Тей – один из величайших и самых известных мостов в мире в то время – в результате чего погибло 75 человек. Заголовок в *«Нью-Йорк-Геральд»* гласил: «Повторится ли катастрофа над рекой Тей между Нью-Йорком и Бруклином?»

В 1882 году, несмотря на то что Эмили умело и уверенно руководила проектом от имени мужа, мэр Бруклина решил отстранить Вашингтона Роблинга от должности главного инженера по причине физической несостоятельности. Он предложил совету попечителей уволить Роблинга и на следующем собрании устроил голосование. После ожесточенных споров, политических дискуссий и заявлений в прессе они собрались на обсуждение и проголосовали.

С перевесом всего в три голоса большинство голосовавших приняли решение, что Вашингтон Роблинг продолжит руководить проектом до его завершения. Спустя почти половину жизни, когда

Роблинга спросили, какую роль сыграла Эмили в строительстве моста, он назвал «ее блестящий талант миротворца» в числе остальных ее личных качеств, которые для этого потребовались. Мне нравится представлять ее идеальным переговорщиком: как она терпеливо выслушивала каждую сторону в многочисленных спорах, тактично высказывала мужчинам предостережения и сглаживала углы в напряженной политической атмосфере. Эмили, несомненно, сыграла важную роль в сохранении наследия своей семьи.

Прежде чем мост открыли для людей, нужно было провести последнее испытание: проверить, как воздействует на постройку лошадь, скачущая рысью. Уже в то время проектировщики хорошо понимали опасности резонанса – движения, вызванного теми, кто ходит и ездит по мосту, – поэтому нужно было принять меры предосторожности, чтобы убедиться, что мост устойчив и безопасен для разных видов транспорта. Эмили стала первой, кто проехал по этому мосту. Она ехала в конном экипаже, держа в руках живого петуха как символ победы.



Церемония открытия Бруклинского моста

Через несколько недель, 24 мая 1883 года, она удостоилась чести сопровождать процессию президента Честера Артура на официальном открытии моста, за которой муж с гордостью наблюдал в телескоп из своей комнаты. Этот день, который назвали Днем народа, стал официальным праздником в Бруклине. Пятьдесят тысяч жителей высыпали на улицы на

праздник в надежде хоть мельком увидеть президента на своем новом мосту. Во многих выступлениях мост называли «чудом науки» и «поразительным примером того, как человек способен изменить лицо природы». Или, в данном случае, как его способна изменить женщина. На официальной церемонии Абрам Хьюитт, один из конкурентов Вашингтона Роблинга, заявил: «Имя Эмили Уоррен Роблинг будет… неразрывно связано со всем, чем мы восхищаемся в человеческой натуре, и с чудесами в строительном мире искусства», – а мост назвал «вечным памятником самопожертвования женщины и ее способностей к высшему образованию, которого ее так долго лишали».

Сегодня на одной из опорных башен моста есть бронзовая табличка, посвященная памяти Эмили, ее мужа и свекра. Ее разместил там Бруклинский инженерный клуб, и на ней написано:

*Строители моста*
*Посвящается памяти*
*ЭМИЛИ УОРРЕН РОБЛИНГ*
*1843–1903*
*чьи верность и смелость помогли ее больному мужу*
*ПОЛКОВНИКУ ВАШИНГТОНУ А. РОБЛИНГУ,*
*ГЛАВНОМУ ИНЖЕНЕРУ*
*1837–1926*
*завершить строительство этого моста*
*по проекту его отца*
*ИОГАННА А. РОБЛИНГА, ГЛАВНОГО ИНЖЕНЕРА*
*1806–1869*
*который посвятил свою жизнь этому мосту*
*«За каждой великой работой стоит*
*самоотверженная преданность женщины».*

Эмили Уоррен Роблинг была блестяще технически подкована и нравилась всем, кто с ней работал. Она пользовалась большим почетом и уважением тех, кто стоял за постройкой этого моста, независимо от их роли и цели в этом проекте. Тот факт, что она, хотя и была женщиной, легко входила во все социальные круги и что ей были рады и политики, и инженеры, и рабочие, а с ее мнением считались и следовали ее указаниям, служит доказательством ее исключительного мастерства, учитывая, что в ту эпоху само присутствие женщины на стройке было делом небывалым.

Как молодой инженер-строитель того же возраста, что и Эмили, когда она работала над мостом, я хорошо знаю обо всех

трудностях и испытаниях, сопутствующих возведению ключевой архитектурной достопримечательности в крупном городе. Только я встретилась с самыми большими трудностями, отучившись по специальности несколько лет, получив опыт работы, рекомендации и поддержку наставников, – то есть я уже стала опытным квалифицированным инженером. А Эмили удалось с ними справиться без формального образования – она даже не получила специальности инженера. Трагические обстоятельства поставили ее в ситуацию, где она никогда не ожидала оказаться, но она проявила себя блестяще и победила. И это не просто какой-то там мост – это огромная 486-метровая висячая конструкция, которая в то время была самым длинным мостом в мире. Это первый мост со стальными натяжными тросами и первый мост, при строительстве которого использовали такие огромные кессоны и взрывчатые вещества в них. Это новаторский проект, которым мы пользуемся и по сей день.

Мемориальная табличка семье Роблингов на Бруклинском мосту

Когда я изучала информацию об этом проекте, то была удивлена тем, насколько по-разному об Эмили отзываются комментаторы. В некоторых источниках ее называют реальной движущей силой проекта. В других о ней нет вообще никаких упоминаний. По крайней мере, по сравнению с другими выдающимися женщинами того времени, она получила хоть какое-то признание. Я рада, что ее имя написано на

мемориальной табличке. Она меня вдохновляет, потому что, несмотря на огромные трудности, ей удалось построить самый технологичный мост того времени благодаря всем инженерным навыкам – техническим знаниям, способности вести диалог с рабочими и убеждать спонсоров, а также упорству – во времена, когда женщинам полагалось молчать и когда с ними не считались.

# Глава 13. Мост

*«Мистер Флирт* снова звонил. Мне удалось избавиться от него всего за 3 минуты 23 секунды».

Как-то на вечеринке меня познакомили с мужчиной, который без умолку болтал: на мой вкус, он был чересчур обходителен – скорее он считал себя очень обходительным, но на самом деле таковым не был. В конце концов мне удалось спастись и избегать его весь остаток вечера. Но я потеряла бдительность, и в какой-то момент мы обменялись телефонами.

За следующие несколько недель он звонил пару раз. В первый раз у меня только что мама приехала из Индии, поэтому я вежливо отказала ему со словами: «Извини, ко мне только что мама приехала, не могу говорить». Во второй раз мне удалось избавиться от него за три с лишним минуты, о чем я гордо написала подруге.

Но мистер Флирт – как мы называли его с подругой – был очень настойчив. Он звонил и писал еще несколько раз (разговоры стали выходить за рамки трех минут). Наконец я согласилась пойти с ним на свидание. Тогда я узнала о нем нечто неожиданное – он был страшным ботаником. Мы говорили о физике, программировании, архитектуре, истории, и я узнала, что он может часами читать Википедию и что у него есть сверхъестественная способность запоминать интересные, но, по сути, бесполезные факты. С того ужина я ушла, стараясь скрыть небольшое волнение.

Не знаю, как это произошло, но на том свидании мистер Флирт заметил, что я тоже немножко ботаник, и придумал хитрую стратегию по привлечению моего внимания. На следующее утро я открыла почту и увидела следующее сообщение: «Мост дня № 1. Пример того, почему нужно как следует проводить анализ демпфирования», – в нем говорилось о мосте через пролив Такома в штате Вашингтон, который обрушился в 1940 году при относительно слабом ветре. Каждое утро я открывала почту, и на моем заспанном лице появлялась широкая улыбка, когда я видела, что пришло новое письмо с мостом дня. Всю неделю он находил и присылал мне статьи с изображениями мостов: у одного была забавная история, у другого уникальный проект, какой-то трагически обрушился, а какой-то был просто очень красивым. Неужели со мной все настолько просто? Конечно, меня не так легко завоевать…

№ 1: Старый Лондонский мост

Старый Лондонский мост, который часто обрушивался

Несмотря на то что отправитель писем по-прежнему казался мне немного надоедливым, мне нравились рассказы о мостах, и я увидела множество конструкций, о которых раньше не слышала. Спустя неделю таких писем мне пришлось признать, что он, по крайней мере, хороший собеседник. Не каждый день слышишь серенаду про мосты. Так что теперь, в честь мистера Флирта, я предлагаю вам свой вариант «Моста дня». Я выбрала пять своих любимых мостов со всего мира – необычных и не очень известных, о которых вы, надеюсь, не слышали. Все они построены из разных материалов: от шелка до стали. Я выбрала их в разных исторических эпохах, и они иллюстрируют разные инженерные методы. Один мост движется, потому что так задумано, другой движется непредвиденно, а еще один построил древний царь. У каждого из них есть уникальная инженерная характеристика, благодаря которой мы сможем взглянуть на то, как люди находили тысячи интересных способов пересекать долины и равнины на протяжении веков.

Этот мост я не видела, потому что его снесли в 1831 году. В его бурной истории есть для меня некая тайна: этот легендарный мост, построенный благодаря страсти и настойчивости одного человека, служил путем через Темзу на протяжении 600 лет. Больше всего меня в нем впечатляет то, что он много веков верно служил Лондону, но в итоге оказался не очень хорош. Несмотря на впечатляющую долговечность, Старый Лондонский мост был неудачной постройкой.

Римляне, как мы уже знаем, очень хорошо строили мосты. Но после заката их Западной империи в IV–V веках до XII века мостов строилось очень мало. Потом финансировать и строить большое количество мостов начала церковь. На многих из них были часовни, где можно было помолиться за безопасный проход и пожертвовать средства на поддержание моста. Существует легенда, что святой Бенезе (который благодаря божественному видению построил мост в Авиньоне) основал Братство понтификов, которое возводило мосты там, где они были нужны для религиозных или общественных целей.

Вдохновившись этими событиями, Питер Коулчерч, викарий небольшой часовни в Лондоне, решил собрать средства на постройку нового моста через Темзу в 1176 году. Он собирал пожертвования от короля, крестьян и всех средних слоев, чтобы построить в Лондоне каменный мост. До этого там был деревянный мост, который постоянно разрушали грозы, пожары, военные стратегии или отсутствие ремонта. Строительство моста окажется для Питера настоящим испытанием, ведь это первый проект моста с каменными опорами в приливной реке. Темза не так проста для строительства – ее уровень меняется почти на 5 м, у нее очень илистое дно и быстрое течение, из-за чего установить опоры очень трудно. Даже доставка строительных материалов к реке обещала целое приключение: камень нужно было везти по мощеным дорогам низкого качества. Но Питер неустрашимо взялся за столь грандиозную задачу.

Жителей средневекового Лондона, должно быть, потрясло строительство первого каменного моста. Они слышали оглушительный стук копров, установленных на баржах, которые медленно поднимали большой груз, а затем с грохотом опускали на сваи, забивая их в русло реки. На сваях образовывались искусственные острова, которые называются *водорезами.* Каждый из них имел форму весельной лодки и был построен из груды камней и валунов разных размеров. Водорезы – и опоры и колонны, которые поднимались над ними и поддерживали полотно моста, – были огромного и разного размера, от 5 до 8 м в ширину. Народ наблюдал, как плотники приделывают к опорам деревянные арочные каркасы. На этих каркасах возводили стрельчатые арки из камня, который в очень опасных условиях поднимали баржи. Лондонцам пришлось ждать целый год, пока достроили первую арку.

В 1209 году, спустя 33 года, мост – длиной 280 м и шириной почти 8 м – наконец достроили, но Питер Коулчерч не дожил до этого момента. Он умер, посвятив строительству 29 лет жизни, и его похоронили в склепе его часовни.

Получившийся мост был сильно недоработан. У него было 19 стрельчатых готических арок разной формы и размера, выполненных из камня разного размера. Хотя такие арки, взятые из исламской архитектуры, были писком моды в зданиях и церквях того времени, для моста они были не лучшим решением. Конечно, благодаря этим аркам средневековые церкви поднялись на небывалую высоту, но мосту не нужно быть высоким, он должен быть достаточной высоты, чтобы соединять два берега реки. Более традиционная полукруглая римская арка здесь подошла бы больше, но, кажется, инженеры предпочли стиль содержанию. В середине находился подъемный мост, который позволял пропускать высокие корабли, а с каждой стороны располагалась оборонительная застава.

Уровень воды в Темзе поднимается и опускается в зависимости от приливов и отливов. Чересчур широкие водорезы перекрывали почти две трети русла и ограничивали естественное течение реки. Во время прилива вода с одной стороны моста была гораздо выше, чем с другой, потому что ей было некуда деваться, и из-за этого она образовывала опасные течения. Кроме самых глупых моряков, никто не рисковал проходить под мостом в это время, люди боялись, что лодки перевернутся, а сами они утонут. Но сотни людей все равно погибали. Может, их жизни могли быть спасены, если бы они прислушались к поговорке, которую придумали про этот мост: «Мудрец пройдет по мосту, а дурак пройдет под мостом».

Что еще хуже, так это то, что люди стали строить на мосту дома. Лично мне нравится идея жить на мосту: наблюдать, как меняется река в течение дня, и наслаждаться великолепными закатами было бы, несомненно, очень здорово. И эта идея прекрасно реализована на Понте-Веккьо во Флоренции в Италии, где грамотно спроектированные и построенные дома и магазины создают ощущение спокойствия и порядка. А дома на Лондонском мосту только создавали беспорядок.

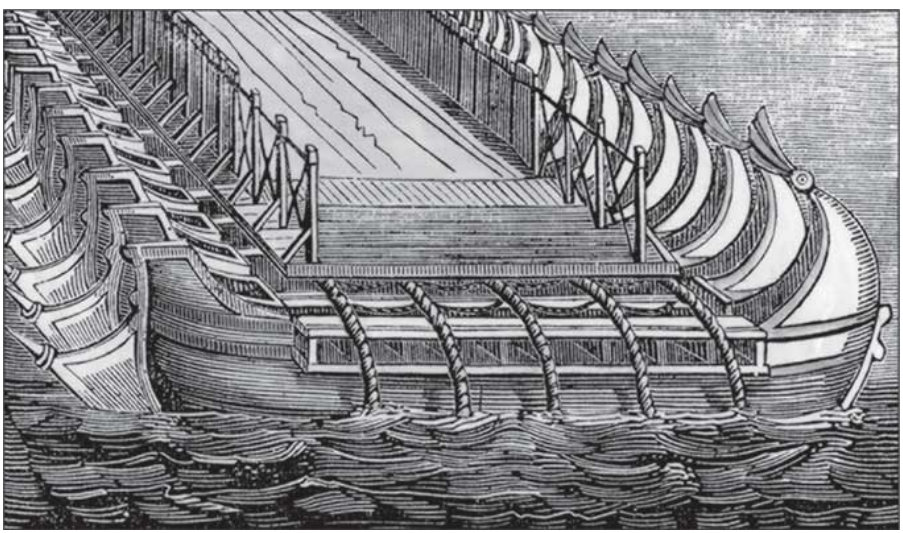
Трех- и четырехэтажные жилища теснились между проезжей частью и краем моста, и их понастроили больше сотни. Там, где лавочники продавали товары, устанавливали временные лотки. С обеих сторон моста свешивались общественные туалеты, откуда отходы сливались прямо в реку. Проект моста не предусматривал веса этих построек, а сами они не отстояли друг от друга на достаточном расстоянии, что создавало огромный риск. Весь мост словно только и ждал несчастного случая. В 1212 году большинство домов сгорело в пожаре вместе с тысячами несчастных, столпившихся на мосту, который с одной стороны залила река, – а потом сильный ветер перенес угли на

противоположный край, и начался новый пожар, а люди оказались в ловушке посередине. После пожара нашли более 3000 сильно или полностью обгоревших трупов, а еще больше людей и вовсе превратились в пепел. В 1381 и 1450 годах из-за бунтов и восстаний пострадали несколько частей моста.

К XV веку построек на мосту стало в два раза больше, и они стали в два раза выше. Эти высокие, нависающие над мостом постройки создавали темные и мрачные проходы, по которым еле двигались телеги, повозки, скот и пешеходы. В часы пик переход моста мог занимать целый час. Так как мост был перегружен постройками, страдал от пожаров, а опорные водорезы изнашивались из-за сильных течений, какая-нибудь часть моста постоянно обрушивалась в воду.

В 1633 году треть домов снова сгорела в пожаре, хотя это было скорее скрытое благословение, потому что тогда между домами на берегу и на мосту наконец-то образовалась прореха. Вероятно, это и спасло постройку от катастрофы в 1666 году, когда Великий лондонский пожар не перекинулся на мост. Мост оказался буквально на волоске, но, кажется, его жители и торговцы урок не усвоили. В пожаре в 1725 году сгорело более 60 домов, и разрушились две арки.

№ 2: Понтон



Понтон: мост из кораблей через море

Дома наконец снесли в 1757 году, и мост пережил смену веков и простоял до 1832 года, когда вдоль него построили новый Лондонский мост (по проекту инженера Джона Ренни). Но тот

первый мост до сих пор живет в нашей культуре: когда я была маленькой, мама пела мне детскую песенку, в которой были слова «Лондонский мост падает, миледи», с небольшим акцентом и слегка фальшивя. Таких песен об инженерии очень мало. Она предостерегает будущих инженеров об опасностях неграмотного проектирования еще до того, как мы научимся ходить.

Когда мы думаем о мосте, то обычно представляем какую-то высокую постройку, которая аккуратно преодолевает расставленные перед ней препятствия. Но второй мост из моей подборки развеет этот образ. Ища мести, древний персидский царь Ксеркс построил огромный «мост», чтобы пересечь море – ни больше ни меньше. Но построил он не летящий мост над водой, а плавучий, который называется *понтоном*.

Отец Ксеркса Дарий I был одним из величайших императоров в истории и правил необъятной территорией, простирающейся от степей Центральной Азии до края Анатолии. Его государство было обширнее империи Александра Великого (а при правлении его преемников стало еще больше). В 492–490 гг. до н. э. он решил, что крошечные греческие города-государства должны ему подчиниться, и отправился в Марафон, чтобы сразиться с армией Афин и Платей. Его внезапное поражение положило конец первому вторжению персов в Грецию.

Дарий планировал вторую попытку, но не дожил до осуществления своих планов. Ксеркс не забыл унижения, которое испытал его отец при Марафоне, и решил осуществить мечту Дария и подчинить греческие государства Персидской империи. Ксеркс много лет обучал солдат, строил планы и собирал ресурсы перед вторжением, но, хотя большинство греческих государств ему подчинились, он снова встретил сопротивление афинян и суровых воинов Спарты.

Персидская армия столкнулась с препятствием, когда в 480 году до н. э. ей нужно было попасть во Фракию через пролив Геллеспонт (ныне Дарданеллы), который отделяет европейскую часть современной Турции от азиатской. Первая попытка пересечь пролив потерпела неудачу, потому что сильная буря разрушила мосты, построенные финикийцами и египтянами, и тогда Ксеркс приказал 300 раз ударить воду плетьми за дерзость. А инженерам, которые построили обрушившиеся мосты, он отрубил головы.

Новые инженеры, вероятно, стараясь спасти свои головы, возвели более устойчивую постройку. Персам нужно было преодолеть 1,5 км по глубокому проливу – по тем временам это было огромное расстояние, на котором трудно использовать традиционные технологии строительства мостов, то есть вначале

закладывать опоры на твердую почву под водой, а затем соединять их между собой. Вместо этого, как рассказывает нам Геродот в своей *«Истории»,* они собрали 674 корабля (*пентеконтеры,* греческие галеры на 50 весел, и *триремы,* низкие и плоские корабли с тремя рядами весел) и соединили их бок о бок в два ряда. На каждом ряду кораблей сверху было два льняных троса и четыре троса из папируса.

Эти тяжелые тросы соединяли корабли вместе и образовывали основание полотна.

Инженеры вырезали длинные деревянные доски и положили их в ряд поверх натянутых тросов. Доски связали между собой и покрыли ровным слоем сломанных веток и сучьев, а затем сверху накидали земли, и получилась дорога, по которой могла пройти армия. Кроме того, инженеры бросили тяжелые якоря вверх и вниз по течению: с востока они не давали унести мост ветрам с Черного моря, а остальные сопротивлялись ветрам с запада и с юга. По обеим сторонам широкого полотна поставили ограды, чтобы лошади не увидели воду и не испугались.

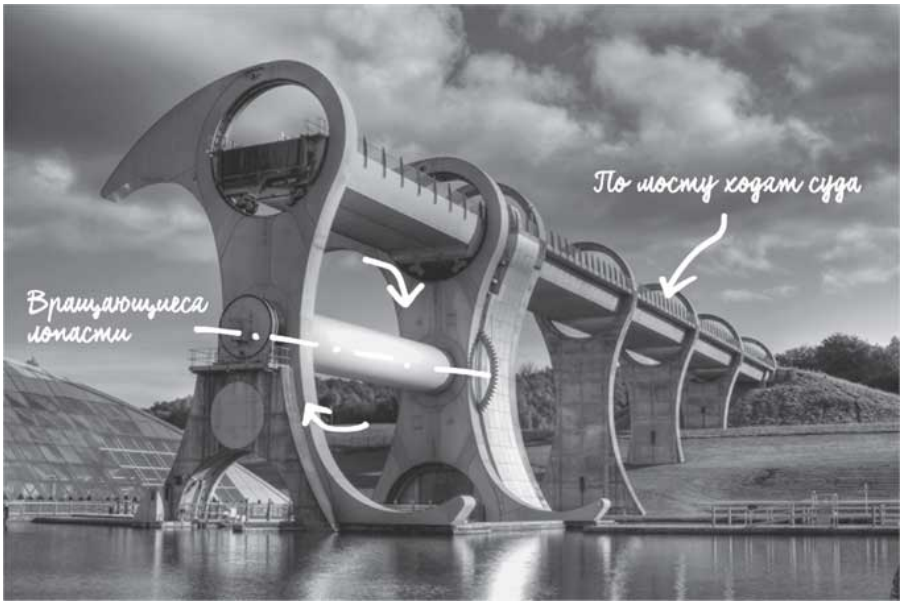
Как только мост из кораблей был готов, Ксеркс помолился о безопасном пути. Он бросил свой кубок, золотую чашу и персидское копье в пролив – может, отдавая дань солнцу, а может, чтобы задобрить море. Затем армия двинулась по огромному понтону на своем пути к грекам. Говорят, что у персов переход с одной стороны залива на другую занял семь дней и семь ночей, в том числе у элитных воинов Ксеркса, которых называли «Бессмертными».

По сравнению с инженерным подвигом, военная часть этой истории менее эпична. Ксеркса разбили в битвах при Саламине и Платеях, и с огромными потерями из-за войны и голода он отступил обратно в Персию. Ксерксу удалось укротить природу, но он не смог подчинить себе греческий народ.

Считается, что понтонные, или плавающие, мосты, придумали в Китае в период с XI по VI в. до н. э., когда инженеры с помощью кораблей с досками пересекали широкие реки. В античную эпоху греки и римляне тоже использовали понтоны – довольно известный пример построил, как предполагается, Калигула, чтобы демонстрировать свою одежду на парадах. Во время Первой и Второй мировых войн солдаты часто прибегали к этой технологии, потому что она позволяла быстро собирать и разбирать переправы. Плавучие мосты – хороший вариант, когда вода глубокая, река широкая, а времени мало. Но бури и сильные течения губительны для таких мостов: есть множество примеров (скажем, мосты Марроу и Худ через каналы в США), которые разрушились при сильной буре. Если один корабль зачерпнет

воды, то потянет за собой остальные, пока вся конструкция не уйдет под воду. К счастью, инженеров уже не ждет та же участь, что при Ксерксе.

№ 3: Фолкеркское колесо




Фолкеркское колесо: вращающийся мост

Мост Ксеркса из кораблей качался на волнах вверх и вниз, а также из стороны в сторону под действием течений, так что проходить по нему, должно быть, было очень неудобно. Нам не нравятся сооружения, которые заметно движутся: это нас пугает и кажется нам небезопасным. Но что делать, если мост спроектирован так, что он вращается? Многие мосты устроены так, что через них по воде могут проходить корабли, а один из моих любимых мостов сам переносит их с одной стороны на другую.

Кельтский двусторонний топор был грозным оружием – с обеих сторон у него были лезвия, так что в битве храбрый воин мог махать им и вправо, и влево с не менее смертоносным результатом. Как бы странно это ни казалось, этот боевой инструмент послужил прототипом самого классного и необычного проекта в мире – Фолкеркского колеса.

Когда-то в низменных каналах Шотландии кипела жизнь. Канал Юнион, открытый в 1822 году, шел из Фолкерка в Эдинбург. По нему в столицу доставляли уголь для обеспечения новых промышленных отраслей, которые строили в городе

заводы. Канал Форт и Клайд (открытый в 1790 году) служил той же цели, только в Глазго – в те времена маленьком городке, который быстро превратился в промышленный центр Шотландии. Однако с развитием железных дорог в 1840-х годах эти каналы, как и многие другие, стали невостребованы, потому что ископаемые было быстрее перевозить на поездах. Постепенно каналы пришли в упадок – к 1930-м годам они были в таком состоянии, что часть системы каналов переполнилась. Прежняя транспортная артерия оказалась навсегда перекрыта – по крайней мере, так казалось.

В конце XX века архитекторы и инженеры решили возобновить работу каналов, создав водное сообщение между Глазго и Эдинбургом, особенно между каналами Форт и Клайд и Юнион.

Возобновление водного сообщения, которому было уже 200 лет, требовало экологического и экономического прогресса населенных пунктов. Это дело представляло несколько сложных технических задач, и в первую очередь мешал большой крутой склон, который нужно было преодолеть. Традиционный способ, с помощью которого строители каналов решали проблему склона, – сооружение *шлюзов*. Между верхней и нижней секциями канала сооружали длинный узкий коридор с высокими стенами и воротами с каждой стороны, которые блокировали воду. Шкиперы, поднимающиеся по каналу, заводили судно в этот коридор и закрывали нижние ворота. Затем они открывали затворы ворот на другом конце коридора, и в него поступала вода из верхнего канала. Постепенно коридор наполнялся, пока уровень воды не сравняется с верхним каналом. Тогда шкиперы открывали верхние ворота и свободно плыли дальше. Когда судно нужно было спустить, процесс повторялся в обратном порядке. Изначально на пути между Эдинбургом и Глазго нужно было целый день проходить 11 таких порогов, открывая и закрывая 44 пары ворот. Едва ли это легкая задача – да и ворота в любом случае с тех пор уже убрали. Поэтому инженерам пришлось хорошенько подумать.

Сегодня, если вы плывете на запад от Эдинбурга по каналу Юнион в сторону канала Клайд или в сторону Глазго, то в какой-то момент попадаете в место, где земля с одной стороны резко обрывается, а вы остаетесь болтаться на акведуке, который словно ведет в пустоту. Так заканчивается канал Юнион. В этом месте вы оказываетесь на своем судне в 24 метрах над землей – на высоте 8-этажного здания. Чтобы спуститься с этой высоты в нижний канал Форт и Клайд, нужно доверить судно объятиям невероятного инженерного изобретения – современной

интерпретации кельтского топора.

Огромное вертикальное колесо (напоминающее колесо обозрения) 35 м в диаметре появляется перед судном. У этого колеса две лопасти в форме топоров, которые вращаются на 180°. В каждой лопасти находится своего рода «гондола»: большой сосуд, в котором умещаются два судна и 250 тысяч литров воды. Гидравлические стальные ворота блокируют воду из верхнего канала. Когда гондола колеса становится вровень с краем акведука, ворота в конце канала и ворота гондолы открываются, так что судно может заплыть прямо в гондолу. Затем ворота закрываются, и лопасти начинают вращаться.

Вы замечали, что, когда колесо обозрения вращается, сиденья тоже вращаются, так что пассажиры так и остаются сидеть вертикально. За весь поворот колеса, снизу вверх и сверху вниз, вы сами не переворачиваетесь. Аналогичным образом с помощью сложного механизма гондолы Фолкеркского колеса сохраняют горизонтальное положение, когда вращаются лопасти. Для одного поворота на 180° нужно совсем немного энергии – то же количество электричества, что потребовалось бы, чтобы вскипятить восемь чайников с водой. Все благодаря Архимеду и его знаменитому принципу, который гласит, что объект, погруженный в воду, вытесняет свой собственный вес. Например, если в одной гондоле будет судно, а в другой его не будет, то гондолы по-прежнему будут иметь одинаковый вес. Судно вытеснит из своей гондолы количество воды, соответствующее его собственному весу. Так как уровень воды в гондолах обеих лопастей одинаковый, нужна лишь минимальная мощность для преодоления инерции и вращения колеса, а затем лопасти вращаются по инерции, пока их не выключат. Фолкеркское колесо переправляет суда из верхней части бассейна в нижнюю (и наоборот) всего за пять минут, по сравнению с целым днем пути, который уходит на прохождение оригинальной системы шлюзов.

В мире несколько таких судоподъемников: например, Стрепи-Тье в Бельгии, Нидерфинов (старейший работающий судоподъемник в Германии) и еще один на электростанции «Три ущелья» в Китае (сейчас это величайший судоподъемник в мире, он поднимает суда вертикально на колоссальную высоту 113 м), но в наблюдении за Фолкеркским колесом и в катании на нем есть особое удовольствие. Возможно, оно пробуждает в нас воспоминания из детства, когда мы катались на колесе обозрения. Это служит примером того, как инженерный проект сочетает в себе эстетические качества и даже нотку ностальгии, которая отчасти сказывается на том, как мы воспринимаем этот объект.

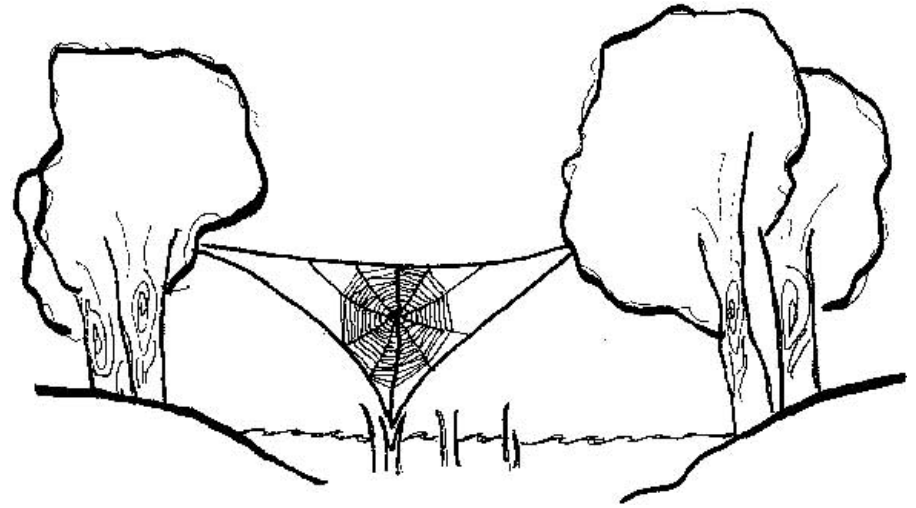
Как-то вечером я читала книгу с включенным телевизором, и успокаивающий голос ведущего передачи наполнял гостиную, но я его не слушала. До тех пор пока не уловила слова «прочный материал» и «мост», – и в этот момент уши у меня навострились, как у кошки. Ведущий рассказывал об одном из самых продуктивных строителей мостов в мире – который, что удивительно, женского пола и живет на Мадагаскаре.

Размером она примерно с ноготь, у нее восемь волосатых ножек, а тельце напоминает по текстуре кору дерева, что, как позднее объяснил Дэвид Аттенборо, помогает ей маскироваться от хищников. Кроме того, у нее есть *прядильный орган,* который как раз и отвечает за ее блестящие инженерные навыки.

Древесный паук Дарвина (caerostris darwini) может построить мост длиной до 25 м (то есть в 1000 раз больше его самого) над рекой или даже озером. В отличие от большинства проектировщиков мостов, этой паучихе не нужно добираться с одного берега на другой. Она таким образом добывает себе пищу.

Она изучает растительность на берегу реки и находит подходящее место для своего проекта (как и любой профессиональный инженер), а затем выпускает десятки шелковых нитей из своего прядильного органа. Они разлетаются в стороны – прямо как у Человека-Паука в кино, – и их подхватывают естественные потоки ветра над водой в густом лесу. Тонкий невидимый поток несет нити через реку, и они цепляются за растения на другом берегу. Этот шелковый путь – первый этап строительства – называется *линией моста.* Это несущий трос – обыкновенный загнутый трос, который прогибается под собственным весом. Дернув за трос и убедившись, что он безопасен, паучиха с помощью волосков на ножках, которые представляют собой крошечные крючки, немного сматывает его, чтобы он не сильно провисал.

№ 4: Шелковый мост



Шелковый мост: самый длинный в мире мост из паутины

Затем она идет по своему несущему тросу и проверяет его прочность, а по дороге с помощью шелка и выделений укрепляет его еще сильнее. Когда она доходит до конца, то укрепляет соединение с растениями, обматывая вокруг них еще несколько нитей. Важно, чтобы это соединение, которое создал ветер, просто приклеив нить к стволу дерева, было достаточно прочным и выдержало вес всей остальной конструкции.

Теперь несущий трос нужно закрепить якорем. Паучиха ищет растения, вроде длинных травинок, торчащих из воды, и идет по тросу, пока не окажется прямо над ними. Медленно вырабатывая шелк, она спускается и привязывает нить к травинке недалеко от поверхности воды, чтобы получился Т-образный каркас.

Следующие несколько часов паучиха легко бегает туда-обратно и к своему Т-образному каркасу приделывает множество шелковых нитей. Она вырабатывает шелк и плетет по кругу большую паутину. Некоторые шелковые нити не липкие: они служат частью каркаса всей конструкции. А остальные липкие, и они составляют ту часть паутины, куда попадется добыча. В результате у нее получается огромный круг диаметром до 2 м.

Древесный паук Дарвина – единственный известный паук, который строит мосты над водой, чтобы ловить добычу. Его жертвами становятся вкусные мухи и стрекозы, которые летают над серединой реки. Из-за большого диаметра паутины туда могут попадать и другие мелкие животные: птицы и летучие мыши.

Размер паутины по-настоящему впечатляет, но еще больше впечатляет шелк, из которого она сделана, и это оправдано: для большой постройки нужен исключительный материал. Шелк

древесного паука испытывали в лаборатории, медленно растягивая его с помощью крючков. Результаты исследований показывают, что эти крохотные создания производят шелк невероятной *упругости.* Это свойство материала, благодаря которому он может растянуться под нагрузкой, а затем вернуться в прежнюю форму: если нагрузку убирают, а материал возвращается к изначальному размеру, то он *упруго деформировался;* если он не полностью восстанавливает первоначальную форму, значит, он *пластично деформировался.* Испытания показали, что шелк этого паука в два раза эластичнее всех остальных известных видов натурального шелка. Он также очень *прочный.* Прочность – это свойство материала, которое показывает, сколько энергии он может поглотить, не разрушаясь. Это сочетание силы (сколько нагрузки материал может выдержать) и *пластичности* (насколько он может деформироваться, не разрушаясь). На самом деле, шелк древесного паука Дарвина – самый прочный биологический материал, который мы знаем на сегодняшний день, – он даже прочнее стали.

Упругость и прочность – прекрасное сочетание свойств для строительных материалов. Возьмем, к примеру, резинки: если у вас тонкая эластичная резинка, но ее можно растянуть на большое расстояние, но с маленькой нагрузкой, потому что она упругая и пластичная, но не очень сильная. Очень толстая резинка из хрупкой резины может выдержать большую нагрузку, но может внезапно оборваться, потому что она сильная, но хрупкая. А в шелке нашего паука эти свойства сочетаются идеально. Он может выдержать большую силу и в то же время растянуться на большое расстояние и не порваться. Благодаря такому сочетанию свойств это идеальный материал для создания самых больших в мире паутин.

Я специально включила в свой список мост древесного паука Дарвина, чтобы не забыть, что не только люди строят всякие сооружения: на самом деле, как показывает это существо, мы по-прежнему отстаем от природы. Мы только сейчас начинаем строить мосты такой же длины, как строит этот паук, по сравнению с размером собственного тела – сейчас рекорд самого длинного моста принадлежит Акаси-Кайке в Японии протяженностью 1991 м. Нас во многом вдохновляет природа (такой тип проектирования называется *биомимикрией*) – например, вентиляционная система в центре Истгейт в Зимбабве спроектирована по образцу пористого термитника, а павильон Квадраччи Художественного музея Милуоки имеет выдвижную конструкцию, напоминающую крылья птиц. Думаю, мы еще

многому можем научиться. Мечта каждого инженера – разработать суперматериал вроде паучьего шелка, который будет невероятно прочным и легким и который можно протянуть над рекой или равниной, чтобы его нити попали на другой берег. А потом мы бы построили длинный мост за несколько часов, прямо как это делает древесный паук Дарвина.

В отеле в Токио нам с мамой дали карту, на которой был написан адрес тонкими закрученными штрихами, напоминающими картинки.

Почерк был красивый, но читать иероглифы мы не умели, поэтому просто дали карту своему таксисту и надеялись, что этого будет достаточно, чтобы попасть в нужное место.

Шел такой сильный ливень, что мы едва различали дорогу, но мы знали, что выехали из города, и теперь нас окружали крутые склоны, покрытые густым зеленым лесом. Мы поднимались все выше по узкой извилистой дороге и наконец доехали до красных ворот с красивыми иероглифами. Наш водитель заехал на стоянку и помахал нам из машины – я надеялась, что он нас подождет. Я застегнула жакет и отправилась по узкой тропинке на поиски моста Ишибунэ – прекрасного образца простого висячего моста-ленты, который до той конкретной поездки был мне еще не знаком.

№ 5: Мост Ишибунэ

Мост Ишибунэ: висячий мост

В том году я получила грант на поездку от Института инженеров-строителей – я предложила изучить особый вид моста. Я поговорила с коллегами, провела небольшое исследование и узнала про висячий мост-ленту, изящный и простой мост, которых в Великобритании лишь несколько. Я хотела узнать о них больше и понять, почему они такие редкие. Я предполагала съездить в Европу и в Японию – туда, где эти мосты используются, – и написать об этом отчет. Первым делом я отправилась в Чехию, где инженеры показали мне огромный

спектр проектов на основе висячего моста-ленты – от мостов с автомагистралями до туннеля, построенного по тем же принципам. Потом в университете в Германии я познакомилась с исследователями, которые построили в лаборатории прототип моста длиной 13 м и проводили над ним эксперименты. Мне тоже дали поучаствовать в «экспериментах» – мне нужно было прыгать на мосту, чтобы заставить его резонировать.

Чтобы построить свой собственный мини-мост такого типа, возьмите две жестяные банки фасоли и поставьте в метре друг от друга – они будут опорами моста. Затем положите на банки две толстые веревки, а концы приклейте скотчем к столу, который будет изображать землю. Чтобы получился мост-лента, ему нужно полотно, а его можно сделать из спичечных коробков. Проделайте в коробках по два отверстия – по одному с каждой стороны, – а потом положите их сверху на веревки. Проденьте резинки через отверстия в коробках. Резинки растянутся, а коробки сожмутся вместе.

Если вы нажмете на мост посередине, то увидите, что несущие тросы натягиваются (другими словами, в них увеличивается растяжение). Веревки тянут скотч, которым их концы прикреплены к столу. Висячий мост-лента устроен таким же образом. Через реку или овраг перекидывают стальные тросы. Тросы толстые – диаметром примерно с кулак – и состоят из многочисленных тонких стальных проводов, которые вместе сплетены в сильную веревку, защищенную снаружи резиновой оболочкой. Бетонные упоры с обоих концов моста поддерживают тросы. Они надежно закреплены в земле. Упоры достаточно сильные и выдерживают натяжение тросов, даже если на мосту много людей. Бетонные планки (то же, что и наши спичечные коробки) с пазами внизу кладут на стальные тросы и соединяют с ними. В планках проделаны сквозные отверстия, через которые их все соединяют между собой более тонкими стальными тросами и затягивают, и так планки сдвигаются вместе.

Форма этих мостов напоминает мне простые веревочные мосты, которые строили наши предки в древности. Эти мосты, как и мост древесного паука, относятся к висячим. Мост-лента еще и очень легкий – бетонные планки довольно тонкие, около 200 мм, – а естественный изгиб стальных тросов придает им изящный и эстетически приятный вид. Не менее важным я считаю и тот факт, что такие мосты очень практичны и их относительно быстро строить. Как только готовы основы, укладка бетонных планок на тросы проходит быстро и просто, поэтому сооружение такого моста оказывает меньшее влияние на окружающую среду.

Мой красный изогнутый японский мост-лента пролегал над

глубоким оврагом, на дне которого струится быстрый поток. Шел ливень, и я ступила на полотно. Мост немного шатался. Я прошла вверх и вниз несколько раз с разной скоростью, а потом попрыгала на нем, чтобы понять, каково это. От этого движения у меня закружилась голова, и я поняла, почему многие не любят такие мосты, несмотря на то, что они очень красивые и их быстро строить.

Они легкие и держатся на тросах, в середине у них большой прогиб, а края довольно крутые, и это может представлять неудобства для пешеходов с колясками и в инвалидных креслах. А еще они движутся – из-за своей легкости и гибкости они не совсем устойчивы, когда по ним ходят. Несмотря на то что они совершенно безопасны, прогиб в сочетании с шаткостью создает впечатление, что мост неустойчив. Жители тех трех стран, которые я уже посетила, любят эти мосты, но им привычно их движение. В других местах висячие мосты-ленты могли не прижиться из-за ложного чувства неустойчивости и отсутствия твердой почвы, в которой можно закрепить упоры, чтобы конструкция крепко держалась.

Вот теперь я точно промокла до нитки, но все равно долго изучала это инженерное творение (в конце концов, я проехала почти 10 тысяч километров, чтобы посмотреть на этот мост, который в Великобритании кажется таким необычным). Когда мост закачался, я вцепилась одной рукой в перила, а другой пыталась удержать зонтик. Мне было трудно долго стоять посередине, потому что вид на глубокую долину, быстрый поток воды внизу и тот факт, что в этом месте качает сильнее всего, даже меня заставили занервничать.

Тем не менее, как любой уважающий себя инженер, я удостоверилась, что мама как следует сфотографировала меня несколько раз *in situ* на мосту, а потом мы побежали к такси, где наш водитель спал, разложив сиденье. Мы поехали обратно в Токио, хорошенько нагулявшись под дождем.

Висячие мосты-ленты, которые я изучила во время своих путешествий, остались со мной: меня вдохновляет тот факт, что простой веревочный мост эволюционировал и вобрал в себя новые технологии и материалы, и, несмотря на его современное содержание, он сохранил простоту и элегантность своего предка. Новые инженерные технологии не обязательно должны быть каким-то сверхновым прорывом – иногда они основаны на скромных изобретениях прошлого.

Мосты – это, конечно, хорошо, но вы, скорее всего, хотите знать, что же там было дальше у нас с мистером Флиртом. Все, что я могу сказать, – я пожалела о том, что похвасталась тогда

подруге, что избавилась от него за три минуты. Четыре года спустя она прочитала это сообщение вслух перед сотнями людей. Когда произносила речь подружки невесты. На моей свадьбе.

Да, дорогой читатель, я вышла за него замуж.

# Глава 14. Мечта

Представьте себе на мгновение мир без инженеров. Забудьте про Архимеда. Откажитесь от Брунеллески, Бессемера, Брюнеля и Базалгетта. Забудьте о Фазлуре Хане, Отисе – и да, не забудьте избавиться от Эмили Роблинг и Ромы Агравал. Что вы видите?

В общем-то, ничего.

Конечно, тогда не было бы ни небоскребов, ни стали, ни лифтов, ни домов, ни канализации под Лондоном (ну уж нет!). Не было бы «Осколка». Телефонов, интернета и телевидения. Ни машин, ни даже телег – да и все равно, потому что все равно не было бы дорог и мостов. И мы даже одежду не носили бы: потому что не было бы ниток и иголок, которыми можно соединять шкуры животных. Не было бы инструментов для поиска пищи, не было бы огня для безопасности, не было бы ни глиняных, ни деревянных домов.

Инженерия – большая часть того, что делает нас людьми. Конечно, есть вороны, которые могут сделать из проволоки крючок и с его помощью добывать пищу, и осьминоги, которые носят кокосовую скорлупу для защиты, но на этом пока все. Инженерные изобретения дали нам самое необходимое – еду, воду, дома, одежду, – а потом и инструменты для земледелия, строительства цивилизаций и полетов на Луну. Десятки тысяч лет изобретений привели нас туда, где мы находимся сейчас. Человеческая изобретательность безгранична. Мы всегда будем хотеть производить больше, жить лучше, решать одну задачу, а за ней следующую. Инженерия создала, в самом буквальном смысле, ткань нашей жизни, она придала форму пространству, в котором мы живем, работаем, существуем.

И она определит наше будущее. Я уже вижу определенные тенденции в инженерии: геометрически неправильные формы, технологии робототехники и 3D-печати, стремление к устойчивости, пересечение различных дисциплин (например биомедицинская инженерия), подражание природе – и они снова изменят наши горизонты и то, как мы живем на планете. Пусть некоторые направления пока кажутся научной фантастикой.

Вычислительные мощности позволили нам рисовать сложные выгнутые формы: например, текучие поверхности Испанского павильона на Экспо-2010, волнистый музей Гуггенхайма в Бильбао и центр Гейдара Алиева в Азербайджане, напоминающий ракушку. Стремление к сложной геометрии уводит нас от традиционных квадратных и прямоугольных зданий к более естественным формам. В настоящее время создание подобных

фигур по-прежнему дорого, потому что для этого нужно деформировать сталь и придать ей нестандартную форму либо построить хитрую форму для отливки бетона. Интересно, что одни эти формы для бетона могут составлять до 60 % стоимости всего проекта, – и, как только бетон затвердеет, их просто выбрасывают. В самом деле, экономия на формах для бетона (или *опалубках*) – одна из причин, почему наши колонны, стены и балки почти всегда прямоугольные: дешево и просто купить прямоугольные листы фанеры.

Поэтому с появлением изогнутых форм нам нужно как следует подумать о том, как их воплощать. (Бетон хорошо для этого подходит, потому что в жидком состоянии ему можно придать любую форму.) Один из способов – брать большие блоки полистирола, аккуратно вырезать в них нужную форму вручную или с помощью техники, а потом заливать в них бетон. Но при этом получается много отходов, потому что блоки уже нельзя повторно использовать. Замечательная идея – которую придумали еще в 1950-х, но пока недостаточно широко использовали, – гибкая мембранная форма. Для нее подойдет почти любой материал, от мешковины до легких пластиковых листов из полиэтилена или полипропилена. Эти материалы сами по себе мягкие и бесформенные, но стоит добавить жидкий бетон, как мы быстро вспоминаем, насколько это податливый и чувствительный материал: бетон взаимодействует с тканью, растягивает и двигает ее, придавая форму. Два таких разных на первый взгляд материала вступают в симбиотические отношения давления и сдерживания.

Испанский архитектор Мигель Фисак спроектировал реабилитационный центр MUPAG в Мадриде (открытый в 1969 году) с использованием этой технологии для создания фасада, напоминающего взбитую подушку. У одного из входов в Хатландс-Проджект в Корнуолле есть стена, напоминающая летящий с неба шелковый платок. Но если к ней прикоснуться, ощутишь твердый бетон. Уверена, мы увидим еще много подобных зданий, в том числе гораздо большего масштаба, потому что использование полиэтилена и полипропилена значительно сокращает количество отходов, к тому же они не так легко рвутся, а если рвутся, то разрывы не распространяются по всему листу. Кроме того, к ним ничего не прилипает, и даже бетон, поэтому их можно использовать многократно. Внутренний стальной усилительный каркас сильно менять не нужно, как и состав бетона. Проблема пока только в том, что мы не привыкли работать таким образом. Это нововведение полностью меняет эстетику зданий: архитекторам и инженерам нужно не отставать

от развития технологий, как и отделам логистики и закупок. Они пойдут в ногу со временем, и уверена, что, когда это произойдет, я буду не единственным человеком, который гладит бетон в общественных местах.

Кстати, о том, что можно гладить: в Калифорнийском университете в Беркли мне как-то удалось приложить руку к печатным 3D-модулям (размером от моей ладони до тарелки), которые можно было собирать и получать небольшие инсталляции, стены, фасады и крыши. Модули были разного цвета, и, когда я спросила почему, ответ меня сильно удивил. Белые детали были из соли. Черные из переработанных шин. Коричневые и серые были из более знакомых мне материалов – глины и бетона соответственно, а фиолетовые – из виноградной кожицы. Все верно: из виноградной кожицы. Исследовательская группа под руководством Рональда Раэля изучает использование необычных материалов (их смешивают со смолами, и получается паста для 3D-принтера) в строительстве. Мне нравится, что помимо работы с традиционными материалами в футуристическом стиле – от геометричных бетонных блоков с неровной перфорацией до маленьких узорчатых шестиугольных глиняных плиток для фасада – они также экспериментируют с переработанными материалами, причем даже из местной индустрии виноделия. Некоторые их проекты построены таким образом, что им не требуется дополнительный каркас. Я подумала, что 3D-печать вместе с новыми невероятными сочетаниями материалов может привести нас в будущее, где мы распечатываем детали, а потом собираем из них свои дома.

И 3D-печать используется не только для изготовления модулей – на самом деле, в Мадриде в 2016 году открылся первый пешеходный мост, изготовленный на 3D-принтере. Его длина составляет 12 м, и его тщательно проанализировали на предмет распределения сил. Материал распределили только по тем секциям, где это требуется, а значит, при его строительстве использовался минимум материала, что сокращает количество отходов и вес готового продукта. Еще сейчас разрабатывают роботов, которые укладывают кирпичи и заливают бетон на стройплощадке: в производство эту инновацию внедрили несколько десятков лет назад, теперь пора и строительной отрасли наверстывать упущенное.

*Биомимикрия* – еще один шаг вперед в возвращении к природе после подражания природным формам и материалам. Теперь мы копируем не только *форму* ульев, бамбука или термитника, но и их *функции.* Известный пример такой техники – репейник, на основе свойств которого создали липучку: мы скопировали его

крючочки и способность цепляться к другим поверхностям. В природе все строится просто и при минимальном расходе материала, и мы можем использовать этот принцип в строительстве. Например, череп птицы состоит из двух костных слоев, между которыми расположены сложные переплетения, разделенные большими воздушными карманами, – по сути, костная ткань естественно образуется вокруг клеток, подверженных высокому давлению, а остальное пространство заполнено пустотами. Лондонский архитектор Андрес Харрис разработал концепцию изогнутого навеса из воздушных подушек, вокруг которых можно отлить бетонную конструкцию наподобие птичьего черепа. А проект выставочного зала Ландесгартеншау в Штутгарте навеян образом морского ежа: его каркас выполнен из переплетенных пластин, или *косточек,* каждая из которых очень легкая и напоминает губку. Выставочный зал построен из 50-миллиметровых фанерных листов, которые разработали на компьютере, а затем произвели с помощью роботов и собрали вместе. Если волшебным образом увеличить яйцо до размеров этого здания, то фанера оказалась бы тоньше яичной скорлупы.

Кроме того, природа исцеляет сама себя: человеческое тело способно определить, когда что-то не так (например, испытывая боль), а потом с помощью нескольких действий решить проблему. До настоящего времени нам приходилось вмешиваться в структуру зданий и делать ремонт – или хирургическую операцию, – когда что-то ломалось. А теперь команда под руководством Фила Пернелла из Университета Лидса проектирует роботов, которые могут перемещаться – как белые кровяные тельца – по трубам в дороге и диагностировать дефекты, которые можно устранить еще до того, как они приведут к эрозии и поломке. Марк Миодауник из Института создания руководит командой, которая разрабатывает 3D-технологию, позволяющую дронам чинить выбоины и другие дефекты дорог, чтобы нам не приходилось перекрывать дороги и чинить их, что сэкономит деньги и уменьшит пробки, – а что, если дорожные работы и вовсе когда-нибудь прекратятся? А команда Кембриджского центра по смарт-инфраструктурам и строительству собирается встраивать в новые здания нервную систему. Тонкий оптоволоконный кабель длиной в десятки километров и с постоянными чувствительными элементами будет изменять напряжение и температуру в сваях, туннелях, стенах, склонах и мостах. Сейчас можно собирать данные, которые ранее были недоступны, и они помогут инженерам не только получать информацию о постройках, но и предотвращать возможные проблемы.

Когда я пытаюсь представить мир будущего, то я вижу союз таких биологических форм с башнями, тонкими, как карандаш, и сохраненными историческими постройками. Башни уже и так гордо демонстрируют нам свою стройность – например, высота небоскреба по адресу: Парк-Авеню, 432, на Манхэттене в 14 раз превышает его ширину. Такие ультратонкие небоскребы бросают вызов стабильности и устойчивости и, как правило, оснащены демпферами. Думаю, мы увидим еще много таких зданий, в которых будут и офисы, и квартиры, и магазины, и общественные места, потому что борьба за место в перенаселенных городах ожесточается. Время идет, и многие из наших исторических зданий начинают терять эффективность: водопроводные и канализационные трубы часто находятся в плохом состоянии, много тепла при обогреве теряется из-за недостаточной изоляции, а балки и перекрытия иногда провисают. Прогуляйтесь по Лондону, и заметите старые, богато украшенные фасады, которые, кажется, ни на чем не держатся, потому что здания за ними снесли. Такие фасады поддерживают скрытые балки и колонны, пока на этом месте не построят новое здание. Технологии вроде лазеров для создания трехмерных карт облегчат инженерам понимание старого и возможность сочетать его с новым.

А если я серьезно задумываюсь о далеком будущем, то представляю, что мои потомки живут под водой в стеклянных капсулах толщиной с лист бумаги, которые не ломаются. Наши мосты станут в десять раз длиннее, потому что их будут делать из графена, «суперматериала» будущего. Может, мы даже будем «выращивать» себе дома из биологического материала, которому можно придать форму и адаптировать под наши потребности.

Но пока я каждый вечер возвращаюсь домой, в теплые объятия своей старой доброй прямоугольной викторианской квартиры из твердого кирпича. Когда я выключаю свет (лежа в обнимку с тем самым плюшевым котом из Нью-Йорка, уже очень потрепанным) и начинаю засыпать, я думаю о том, что еще создадут Витрувии и Эмили Роблинг будущего. Возможности ограничены лишь нашим воображением, потому что все, что мы можем себе представить, инженеры могут воплотить.

# Благодарности

Спасибо вам,

Стеф Эбдон, которая подкинула мне идею написать книгу, хоть я тогда и посмеялась и сказала, что это никогда не произойдет. Я просто в восторге, что сделала это.

Патрик Уолш, невероятный агент, который поверил в меня и мою идею, научил меня придавать тексту текстуру и поддерживал меня на каждом этапе процесса. Лео Холлис, за поддержку и за своевременное знакомство с Патриком.

Натали Беллос, блестящий редактор, которая увидела что-то в моем проекте и направляла меня на протяжении его развития. Ее идеи, самоотверженность (даже во время отпуска) и внимание к деталям несравненны. Лиза Пендрей и Лена Холл – за превращение этой книги в реальный физический объект и за помощь в преодолении финишной черты. Паскаль Карисс – за то, что заставил мои «предложения гореть» и вдохнул жизнь в мой текст. Бен Самнер – за безупречное редактирование. Международная команда «Блумсбери» – за воспитание моего детища и превращение его в ту книгу, которой оно является сегодня.

Блестящие мексиканские инженеры, с которыми я познакомилась: доктор Эфраин Овандо-Шелли (Instituto de Ingenieria, UNAM), который показал мне Кафедральный собор Мехико. Доктор Эдгар Тапиа-Эрнандес, доктор Лусиано Фернандес-Сола, доктор Тициано Переа и доктор Угон Хуарес-Гарсиа (Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco), которые объяснили мне проблемы почвы и землетрясений. Британский Совет, за организацию запоминающейся поездки в Мехико.

Фил Страйд из Tideway, Карл Ратцко, Нил Поултон, Саймон Дрисколл из WSP, Рональд Раэл из Калифорнийского университета в Беркли – за ваше время и интервью, которые помогли мне в исследованиях. Роберт Халс из музея Брюнеля – за проницательность.

Роб Томас, фонтан энциклопедических знаний из библиотеки Института инженеров-строителей, который находил мне самые непонятные источники и всегда находил время послушать мой бред. Дебра Фрэнсис из библиотеки Института инженеров-строителей за помощь.

Марк Миодауник, чья книга *«Stuff Matters»* послужила мне вдохновением (она по-прежнему лежит у меня на прикроватной тумбочке): ты самый добрый парень на свете и так много для

меня сделал. Тимандра Харкнесс – за поддержку и знакомство с удивительными друзьями по переписке в NeuWrite, которые комментировали и критиковали мой труд.

Джон Паркер, Дин Рикс, Рон Слейд. Вся команда «Осколка». Директора WSP – за невероятные десять лет обучения и роста. Дэвид Холмс и Гордон Кью из Interserve. Джон Пристланд, Майк Бертон, Питер Сатклифф и Дэрран Ливер из AECOM: все мои начальники, которые меня очень поддерживали – я знаю, что я «необычный» работник.

Дэвид Мондрилл, Джо Харрис, Мэй Чиу, доктор Кристина Берр, Джеймс Диксон, Пуджа Агравал, Нири Арамбепола, Эмма Боус, Крис Госден, Джереми Паркер, Карл Ратцко и Крис Кристо, дорогие друзья и коллеги (и сестра), которые читали главы из этой книги, проверяли и помогали.

Инженеры и ученые, организации и предприятия, которые вдохновили меня выйти на свет и рассказать людям о том, чем мы занимаемся. Спасибо за предоставленную мне возможность писать и выступать. Я с оптимизмом смотрю в будущее нашего общего дела: на его инновации, его влияние на все, что нас окружает.

Спасибо моей семье – всем родственникам, что есть у меня в мире, – моим бабушкам и дедушкам, тетям, дядям, двоюродным братьям и сестрам, племянникам и племянницам и моей свекрови, которые всегда поддерживали меня и терпеливо ждали, когда закончится этот огромный проект. Спасибо моим друзьям, с кем я не так часто виделась в последнее время, – теперь мы все наверстаем. Я знаю, что вы всегда со мной. Моим близким, которых уже нет в живых, – я скучаю.

Моим родителям, Хему и Линетт Агравалам, моей сестре Пудже Агравал: с чего начать? Спасибо за то, что всегда говорили мне, что я добьюсь всего, чего хочу, усердным трудом, за конструктор «Лего», за науку и наши путешествия, за лучшее образование, за сложные задачи и вопросы и за всю вашу любовь.

И, наконец, спасибо моему *мистеру Флирту,* или Бадри Вадавадиги, который вел меня – и иногда пинал и кричал – все четыре года написания этой книги, который прочел эти слова столько раз, сколько их не читал никто, за то, что напоминал мне, что я смогу, когда я сама в это не верила, за то, что отчитывал меня, когда меня одолевала прокрастинация, за хорошую обратную связь, за название книги, за то, что заставил мечтать масштабнее, и за всю твою любовь. Пусть у кого-то будет больше мостов дня.

*Рома Агравал, февраль 2018*

# Источники


Addis, Bill. *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. University of Michigan: Phaidon, 2007.

Agrawal, Roma. 'Pai Lin Li Travel Award 2008 – Stress Ribbon Bridges.' *The Structural Engineer*, Volume 87, 2009.

Agrawal, R., Parker, J. and Slade, R. 'The Shard at London Bridge.' *The Structural Engineer*, Volume 92, Issue 7, 2014.

Ahmed, Arshad and Sturges, John. *Materials Science in Construction: An Introduction*. Routledge, 2014.

Allwood, Julian M. and Cullen, Jonathan M. *Sustainable Materials – Without the Hot Air: Making Buildings, Vehicles and Products Efficiently and with Less New Material*. UIT Cambridge, 2015.

Balasubramaniam, R. 'On the corrosion resistance of the Delhi iron pillar.' *Corrosion Science*, Volume 42, Issue 12, 2000.

Bagust, Harold. *The Greater Genius? A Biography of Marc Isambard Brunel*. The University of Michigan: Ian Allan, 2006.

Ballinger, George. 'The Falkirk Wheel: from concept to reality.' *The Structural Engineer*, Volume 81, Issue 4, 2003.

Barton, Nicholas and Stephen Myers. *The Lost Rivers of London: their effects upon London and Londoners, and those of London and Londoners upon them*. Historical Publications, Limited, 2016.

British Constructional Steelworks Association. *A Century of Steel Construction 1906–2006*. British Constructional Steelworks Association, 2006.

Blockley, David. *Bridges: The Science and Art of the World's Most Inspiring Structures*. Oxford: Oxford University Press, 2010.

Brady, Sean. 'The Quebec Bridge collapse: a preventable failure.' *The Structural Engineer*, 92 (12), 2014 (2 parts).

Brown, David J. *Bridges: Three Thousand Years of Defying Nature*. London: Mitchell Beazley, 1993.

Bryan, Tim. *Brunel: The Great Engineer*. Ian Allan, 1999.

Clayton, Antony. *Subterranean City: Beneath the Streets of London*. London: Historical Publications, 2010.

Cross-Rudkin, P. S. M., Chrimes, M. M. and Bailey, M. R. *Biographical. Dictionary of Civil Engineers in Great Britain and Ireland, Volume 2*: 1830–1890.

Crow, James Mitchell. 'The concrete conundrum.' *Chemistry World*, 2008.

Davidson, D. 'The Structural Aspects of the Great Pyramid.' *The Structural Engineer*, Volume 7, Issue 7, 1929. (Paper read before the Yorkshire Branch at Leeds on 7 February 1929).

Dillon, Patrick (writer) and Biesty, Stephen (illustrator). *The Story*

*of Buildings: From the Pyramids to the Sydney Opera House and Beyond*. Candlewick Press, 2014.

European Council of Civil Engineers. *Footbridges – Small is beautiful*. European Council of Civil Engineers, 2014.

Fabre, Guilhem, Fiches, Jean-Luc, Leveau, Philippe, and Paillet, Jean Louis. *The Pont Du Gard: Water and the Roman Town*. Presses du CNRS, 1992.

Fahlbusch, H. 'Early dams.' *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Engineering History and Heritage*, Volume 162, Issue 1, 1 Feb 2009 (19–28).

'The Falkirk Wheel: a rotating boatlift.' *The Structural Engineer*, 2 January 2002.

Fitchen, John. *Building Construction Before Mechanization*. MIT Press, 1989.

Giovanni, Pier and d'Ambrosio, Antonio. *Pompeii: Guide to the Site*. Electa Napoli, 2002.

Gordon, J. E. *Structures: or why things don't fall down*. Da Capo Press, 2009.

Gordon, J. E. *The New Science of Strong Materials: or why you don't fall through the floor*. United States of America: Penguin Books, 1991.

Graf, Bernhard. *Bridges that Changed the World*. Prestel, 2005.

Hanley, Susan B. 'Urban Sanitation in Preindustrial Japan.' *The Journal of Interdisciplinary History*, Volume 18, No. 1, 1987.

Hibbert, Christopher, Keay, John, Keay, Julia and Weinreb, Ben. *The London Encyclopaedia*. Pan Macmillan, 2011.

Holland, Tom. *Rubicon: The Triumph and Tragedy of the Roman Republic*. Hachette UK, 2011.

Home, Gordon. *Old London Bridge*. Indiana University: John Lane, 1931.

Khan, Yasmin Sabina. *Engineering Architecture: The Vision of Fazlur R. Khan*. W. W. Norton, 2004.

Lampe, David. *The Tunnel*. Harrap, 1963.

Landels, J. G. *Engineering in the Ancient World*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1978.

Landau, Sarah Bradford and Condit, Carl W. *Rise of the New York Skyscraper 1865–1913*. New Haven and London: Yale University Press, 1999.

Lepik, Andres. *Skyscrapers*. Prestel, 2008.

Levy, Matthys and Salvadori, Mario. *Why Buildings Fall Down: How Structures Fail*. United States of America: W. W. Norton, 2002.

Mathewson, Andrew, Laval, Derek, Elton, Julia, Kentley, Eric and Hulse, Robert. *The Brunels' Tunnel*. ICE Publishing, 2006.

Mays, Larry, Antoniou, George P. and Angelakis, N. 'History of Water Cisterns: Legacies and Lessons.' *Water*. 5. 1916–1940. 10.3390/

w5041916.

McCullough, David. *The Great Bridge: The Epic Story of the Building of the Brooklyn Bridge*. Simon & Schuster, 1983.

Mehrotra, Anjali and Glisic, Branko. *Deconstructing the Dome: A Structural Analysis of the Taj Mahal*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2015.

Miodownik, Mark. *Stuff Matters: Exploring the Marvellous Materials at Shape Our Man-Made World*. Penguin UK, 2013.

Oxman, Rivka and Oxman, Robert (guest-edited by). *The New Structuralism. Design, engineering and architectural technologies*. Wiley, 2010.

Pannell, J.P.M. *An Illustrated History of Civil Engineering*. Univerity of California: Thames and Hudson, 1964.

Pawlyn, Michael. *Biomimicry in Architecture*. RIBA Publishing, 2016.

Pearson, Cynthia and Delatte, Norbert. *Collapse of the Quebec Bridge, 1907*. Cleveland State University, 2006.

Petrash, Antonia. *More than Petticoats: Remarkable New York Women*. Globe Pequot Press, 2001.

Poulos, Harry G. and Bunce, Grahame. *Foundation Design for the Burj Dubai – The World's Tallest Building*. Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 2008.

Randall, Frank A. *History of the Development of Building Construction in Chicago Safety in tall buildings*. Institution of Structural Engineers working group publication, 2002 Salvadori, Mario. *Why Buildings Stand Up*. United States of America: W. W. Norton and Company, 2002.

Santoyo-Villa, Enrique and Ovando-Shelley, Efrain. *Mexico City's Cathedral and Sagrario Church, Geometrical Correction and Soil Hardening 1989–2002 – Six Years After*.

Saunders, Andrew. *Fortress Britain: Artillery Forti cation in the British Isles and Ireland*. Beaufort, 1989.

Scarre, Chris (editor). *The Seventy Wonders of the Ancient World: The Great Monuments and How They Were Built*. Thames & Hudson, 1999. Shirley-Smith, H. *The World's Greatest Bridges*. Institution of Civil Engineers Proceedings, Volume 39, 1968.

Smith, Denis. 'Sir Joseph William Bazalgette (1819–1891); Engineer to the Metropolitan Board of Works.' *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.58, Iss. 1, 1986.

Smith, Denis (editor). 'Water-Supply and Public Health Engineering', *Studies in the History of Civil Engineering*, Volume 5.

Sprague de Camp, L. *The Ancient Eng ineers*. Dorset, 1990.

*Soil Survey, Tompkins County, New York*, Series 1961 No.25. United States Department of Agriculture, 1965.

Trout, Edwin A. R.. 'Historical background: Notes on the Development of Cement and Concrete', September 2013.

Tudsbery, J.H.T. (editor). *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*

Vitruvius. *The Ten Books on Architecture* (translated by Morgan, Morris Hicky). Harvard University Press, 1914.

Walsh, Ian D. (editor). *ICE Manual of Highway Design and Management.* ICE Publ., 2011.

Weigold, Marilyn E. *Silent Builder: Emily Warren Roebling and the Brooklyn Bridge*. Associated Faculty Press, 1984.

Wells, Matthew. *Engineers: A History of Engineering and Structural Design*. Routledge, 2010.

Wells, Matthew. *Skyscrapers: Structure and Design. Laurence King Publishing*, 2005.

West, Mark. *The Fabric Formwork Book: Methods for Building New Architectural and Structural Forms in Concrete*. Routledge, 2016.

Wood, Alan Muir. *Civil Engineering in Context*. Thomas Telford, 2004. Wymer, Norman. *Great Inventors (Lives of great men and women, series III)*. Oxford University Press, 1964.

https://www.tideway.london

http://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis

http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/r363/c6.pdf

http://mappinglondon.co.uk/2014/londons-other-underground-network/

http://www.pub.gov.sg/about/historyfuture/Pages/HistoryHome.aspx

http://www.clc.gov.sg/Publications/urbansolutions.htm

http://www.thameswater.co.uk/

http://www.bssa.org.uk/about_stainless_steel.php?id=31

https://www.newscientist.com/article/dn19386-for-self-healing-concrete-just-add-bacteria-and-food/

http://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/quebec-bridge-disaster-feature/

http://www.documents.dgs.ca.gov/dgs/pio/facts/LA workshop/climate.pdf

http://www.cement.org/

http://www.unmuseum.org/pharos.htm

http://www.otisworldwide.com/pdf/AboutElevators.pdf

http://www.waterhistory.org/histories/qanats/qanats.pdf

http://users.bart.nl/~leenders/txt/qanats.html

http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html

http://www.worldstandards.eu/cars/driving-on-the-le/

http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/

journal.pone.0026847
https://www.youtube.com/watch?v = gSwvH6YhqIM
http://www.livescience.com/8686-itsy-bitsy-spider-web-10-times-stronger-kevlar.html
http://linkis.com/www.catf.us/resource/bGp
http://www.bbc.co.uk/news/magazine-33962178
http://www.romanroads.org/
http://www.idrillplus.co.uk/CSSROADMATERIALSCONTAININGTAR171208.pdf
http://www.groundwateruk.org/Rising_Groundwater_in_Central_London.aspx
http://indiatoday.intoday.in/story/1993-bombay-serial-blasts-terror-attack-rocks-indianancial-capital-over-300-dead/1/301901.
http://www.nytimes.com/1993/03/13/world/200-killed-as-bombings-sweep-bombay.html?pagewanted = all
http://www.bbc.co.uk/earth/story/20150913-nine-incredible-buildings-inspired-by-nature
http://www.thinkdefence.co.uk/2011/12/uk-military-bridgingoating-equipment/
http://www.meadinfo.org/2015/08/s355-steel-properties.html?m = 1
http://www.fabwiki.fabric-formedconcrete.com/
http://www-smartinfrastructure.eng.cam.ac.uk/what-we-do-and-why/focus-areas/sensors-data-collection/projects-and-deployments-case-studies/bre-optic-strain-sensors
http://www.instituteofmaking.org.uk/research/self-healingcities

# Источники изображений

P.8 courtesy of Martin Avery; P.9 courtesy of John Parker and Roma Agrawal; P.12 courtesy of Major Matthews Collection; P.18 © kokkai; P.27 © Dennis K. Johnson; P.32 © Prisma by Dukas Presseagentur GmbH / Alamy Stock Photo; P.33 © Fernand Ivaldi; P.16 © Craig Ferguson; P.38 © robertharding / Alamy Stock Photo; P.49 © Evening Standard / Stringer; P.67 © mmac72; P.68 © Darren Robb; P.74 © Anders Blomqvist; P.80 © duncan1890; P.85 © Henry Ausloos; P.89 courtesy of Roma Agrawal; P.94 © DNY59; P.112 © Allan Baxter; P.123 courtesy of Roma Agrawal; P.133 courtesy of wikipedia; P.136 © Alvin Ing, Light and Motion; P.139 © Garden Photo World / Suzette Barnett; P.152 © Paola Cravino Photography; P.166 © De Agostini / L. Romano; P.174 courtesy of wikipedia; P.189 © exaklaus-photos; P.208 © Heritage Images; P.212 © Heritage Images; P.222 © Everett Collection Historical / Alamy Stock Photo; P.227 © Fotosearch / Stinger; P.236 © Stock Montage; P.238 © Washington Imaging / Alamy Stock Photo; P.243 © Popperfoto; P.248 © North Wind Picture Archives / Alamy Stock Photo; P.251 © Empato

* * *

# КОГДА ВЫ ДАРИТЕ КНИГУ, ВЫ ДАРИТЕ ЦЕЛЫЙ МИР

**ХОТИТЕ ЗНАТЬ БОЛЬШЕ?**

**Заходите на сайт:**
https://eksmo.ru/b2b/

**Звоните по телефону:**
+7 495 411-68-59, доб. 2261

ВАШ ЛОГОТИП НА ОБЛОЖКЕ

ВАШ ЛОГОТИП НА КОРЕШКЕ

ОБРАЩЕНИЕ К КЛИЕНТАМ НА ОБЛОЖКЕ